

UNIVERSITÉ PARIS 13

Équipe de recherche en « épidémiologie nutritionnelle »

Financement : ADEME et INRA

Année 2019

Thèse

Pour obtenir le grade de

Docteur de l'université Paris 13

Discipline : Santé Publique

Présentée et soutenue publiquement le 21 octobre 2019 par

Louise Lucie SECONDA

Née le 9 octobre 1991 à Le Blanc-Mesnil

Titre : Identification de nouveaux profils alimentaires : Estimation des impacts environnementaux et individuels
--

Thèse dirigée par :

La Dr. Emmanuelle Kesse-Guyot

JURY :

Madame la Docteur Emmanuelle Kesse Guyot	Directrice de thèse
Madame la Professeur Irini Margaritis	Rapporteuse
Monsieur le Docteur Hayo Van Der Werf	Rapporteur
Madame la Docteur Olga Davidenko	Examinatrice
Monsieur le Professeur Pierre Lombrail	Examineur
Monsieur le Professeur Serge Hercberg	Examineur

*« Chaque génération, sans doute, se croit vouée à refaire le monde.
La mienne sait pourtant qu'elle ne le refera pas.
Mais sa tâche est peut-être plus grande.
Elle consiste à empêcher que le monde ne se défasse. »*
Albert Camus, Discours de Suède, 1957

Remerciements

J'exprime ma profonde gratitude à ma directrice de thèse, la Docteur Emmanuelle Kesse-Guyot. Je la remercie de m'avoir proposé de travailler avec elle sur ce projet de thèse et d'avoir cru en mes capacités de réussite. Merci également pour tout ce qu'elle m'a transmis, sa disponibilité et son accompagnement dans l'ensemble des travaux de cette thèse.

Je remercie également la direction de l'équipe de recherche en épidémiologie nutritionnelle, pour son accueil au sein du laboratoire.

J'adresse mes sincères remerciements au Professeur Irini Margaritis et au Docteur Hayo Van Der Welf qui m'ont fait l'honneur d'accepter la charge de rapporter cette thèse, ainsi qu'aux Docteur Olga Davindenko, Professeur Pierre Lombrail et Professeur Serge Hercberg pour avoir accepté si gentiment de faire partie de mon jury de thèse.

Un grand merci à l'ADEME et à l'INRA d'avoir cofinancé cette thèse. En particulier, je remercie Sarah Martin, Vincent Colomb et Jean Dallongeville pour avoir suivi mes travaux en tant que référents. Un grand merci également aux salariés de la cellule thèse de l'ADEME qui avec un grand professionnalisme ont géré les points administratifs ainsi que l'organisation de rencontres avec les autres doctorants financés par l'ADEME. Je garde de ces journées de très bons souvenirs, découvertes professionnelles et de très belles rencontres.

Je remercie également le Professeur Dominique Ledoux pour l'accueil au sein de l'école doctorale Galilée de l'université Paris 13 ainsi que pour la bourse qui m'a permis d'assister aux négociations climatiques à Bonn. Je remercie également les professionnels qui ont participé à mes différents comités de thèse : Vincent Colomb, Sarah Martin, Jean Dallongeville, Denis Lairon, Philippe Pointereau, Sabine Houdart, Louis-Georges Soler, Caroline Méjean, Chantal Julia et Mathilde Touvier. Ces comités m'ont permis de faire le point sur l'avancement des travaux, de recueillir des avis extérieurs et de m'entraîner à présenter et répondre aux questions.

Je tiens également à remercier tout particulièrement Emmanuelle Kesse-Guyot, Julia Baudry, Brigitte Langevin, Philippe Pointereau et Denis Lairon pour l'énorme travail de recueils des données réalisé en amont de cette thèse. Benjamin Allès avec qui j'ai beaucoup travaillé sur le processus de validation de l'indice d'évaluation de la durabilité des régimes. Ainsi qu'Hélène Fouillet, François

Mariotti et Jean-François Huneau avec qui c'était un plaisir de collaborer sur les travaux d'optimisation.

Un grand merci à l'ensemble des équipes supports et des chercheurs de l'équipe de recherche en épidémiologie nutritionnelle (EREN) pour leur accueil et leur travail me permettant de réaliser cette thèse dans de bonnes conditions.

Je remercie tout particulier les doctorants : Manon, Lucie, Marc, Camille, Moufidath, Pauline, Bernard, Éloi, Roland, Dan et Valentin. C'était un plaisir de travailler à vos côtés. Votre soutien, votre esprit d'équipe et nos éternels débats sur l'Académie française me manqueront.

Je remercie également Camille Lacour et Anaëlle Rabes qui ont contribué lors de leur stage d'ingénieur à faire avancer les travaux de l'EREN sur les impacts environnementaux des régimes alimentaires.

Je remercie tous les nutrinautes qui complètent consciencieusement les questionnaires et nous permettent d'obtenir d'intéressants résultats pour la santé publique.

Un grand merci aux amis qui m'ont accompagné, écouté, rassuré et m'ont fait rire durant ces trois ans. Un grand merci à Hélène, Lola, Mathieu, François et mon papa pour leurs conseils et relectures de ce manuscrit de thèse.

Je remercie également tous les copains d'ISF-Agrista œuvrant pour la réalisation de la souveraineté alimentaire et de modèles agricoles respectueux des équilibres socio-territoriaux et écologiques. C'est un plaisir de passer des week-ends, soirées, et même parfois bonnes parties de la nuit à faire avancer nos projets ! Je ne peux vous cacher que nos discussions m'ont permis d'aller beaucoup plus loin et je vous en remercie.

Enfin, j'ai une pensée pour ma famille qui toujours dans la bonne humeur m'a laissé libre de mes choix professionnels tout en me soutenant, en croyant à mes potentiels et en m'encourageant. Je réalise que j'ai beaucoup de chance de vous avoir à mes côtés.

Table des matières

Remerciements	4
Table des tableaux.....	10
Table des figures.....	12
Abréviations	13
Production scientifique	15
Préambule	18
I- Introduction et état de l'art.....	20
1) De nombreuses critiques des systèmes alimentaires actuels.....	20
a/ Pour des raisons environnementales.....	22
b/ Pour leur incapacité à nourrir convenablement le monde.....	28
c/ Pour son partage insuffisant de la valeur économique et sa faible considération des aspects sociaux.....	38
2) Le concept de durabilité appliqué au régime alimentaire	42
a/ Vers une alimentation durable	42
b/ Application de la durabilité à l'alimentation	45
c/ Un développement d'alternatives entrant dans le débat sur l'alimentation durable	48
3) État de l'art sur l'étude de la durabilité des régimes alimentaires	51
a/ Comment nourrir une population mondiale croissante durablement ?	51
b/ Les leviers à l'échelle des régimes alimentaires	55
c/ Lien entre régimes alimentaires plus durables et la santé	65
4) Bilan de l'introduction	68
II- Objectifs de la thèse	69
III- Matériels et méthodes	71
1) Présentation générale de l'étude NutriNet-Santé et du projet BioNutriNet	71
a/ La cohorte NutriNet-Santé.....	71
b/ Le projet BioNutriNet.....	72
2) Recueil et traitement des données individuelles	73
a/ Données alimentaires distinguant les modes de production biologiques ou conventionnels	73
b/ Données sur les comportements et préférences alimentaires	76
c/ Données de santé.....	77
d/ Recueil des données relatif au statut socioéconomique et aux modes de vie.....	78

3)	Évaluation des impacts environnementaux des régimes alimentaires.....	79
a/	Description des analyses de cycle de vie des produits bruts grâce à l’outil DIALECTE	79
b/	Description des indicateurs environnementaux obtenus par DIALECTE	81
c/	Traitement des cas particuliers	84
d/	Distribution des indicateurs et traitement des valeurs manquantes.....	85
e/	Passage des aliments bruts aux items du questionnaire	85
f/	Mesure d’un score générique des impacts environnementaux du régime.....	87
4)	Évaluation du coût monétaire des régimes alimentaires.....	88
a/	Recueil des prix et construction d’une base de données	88
b/	Mesure du coût monétaire du régime et du budget alloué à l’alimentation.....	88
5)	Échantillon d’étude	89
a/	Sélection de l’échantillon.....	89
b/	Redressement	89
c/	Imputations multiples	90
6)	Méthodes statistiques et outils mathématiques	90
a/	Analyse de covariable (ANCOVA).....	90
b/	La régression des rangs réduits	91
c/	La classification.....	92
d/	Modèle de Cox.....	93
e/	Les modèles mixtes	94
f/	L’optimisation	95
IV-	Identification et caractérisation de comportements alimentaires plus durables au sein de la cohorte NutriNet Santé.....	97
1)	Contexte et objectifs	97
2)	Approches centrées sur le climat	98
a/	Population d’étude et méthodes appliquées	98
b/	Résultats	99
c/	Interprétation des résultats.....	104
d/	Conclusion de l’étude	107
3)	Approche par des méthodes exploratoires et formation de clusters.....	107
a/	Population d’étude et méthodes appliquées	107
b/	Résultats	109
c/	Interprétation des résultats	115

4) Approche a priori par la construction d'un score, le SDI.....	120
a/ Population d'étude et méthodes appliquées dans ce travail	120
b/ Résultats	125
c/Interprétation des principaux résultats	130
5) Discussion et comparaison des méthodes	134
V Étude des associations entre des comportements alimentaires plus durables et les événements de santé	137
1) Associations entre le SDI et l'évolution de la masse corporelle et la survenue de l'obésité et du surpoids	137
a/ Population d'étude et méthodes appliquées dans ce travail	137
b/ Résultats	139
c/ Interprétation des résultats	144
2) Étude des associations entre le SDI et la survenue de certaines maladies chroniques.....	147
a/ Méthode et population d'étude	148
b/ Résultats	149
c/ Interprétation des résultats	153
3) Comparaison des forces de prédiction entre le SDI et ses sous-indices	156
a/ Méthodes.....	157
b/ Résultats	157
c/ Interprétation des résultats	158
VI Identification des leviers d'amélioration de la durabilité des régimes par l'optimisation	160
1) Choix du modèle et population d'étude	160
a/ Les variables du problème	160
b/ Les fonctions objectifs	161
c/ Les contraintes	162
d/ Résolution du problème	166
e/ La population d'étude.....	168
2) Résultats	168
a/ Caractéristiques de la population d'étude.....	168
b/ Résultats des étapes intermédiaires.....	170
c/ Résultats en fin d'optimisation	174
3) Interprétation et discussion des résultats.....	178
a/ Résumé des principaux résultats	178

b/ Discussion sur les résultats des régimes intermédiaires	179
VII Discussion générale.....	184
1) Résumé des principaux résultats.....	184
2) Discussion des résultats au regard du contexte actuel	188
a/ Plusieurs approches pour définir un régime alimentaire durable	188
b/ Généralisation des résultats?	191
c/ Interprétation des associations avec la santé	192
d/ Usage de l'optimisation comme outil d'aide à la décision	193
e/ La question du bonheur	193
3) Perspectives pour la suite des recherches	194
a/ Enrichissement des résultats avec de nouvelles données	194
b/ Validation des associations	195
c/ Optimisation : de nombreux travaux à entreprendre.....	195
d/ Mieux considérer les possibilités et freins aux changements	196
e/ Diffusion des travaux de recherche	196
Conclusion générale	198
Références.....	199
Résumé.....	219
Abstract	221
Annexes	223

Table des tableaux

Tableau 1: Postes de consommation d'énergie primaire et mode de calcul par production.....	81
Tableau 2: Postes d'émission de gaz à effet de serre et mode de calcul par production.....	83
Tableau 3: Agrégation de productions en produit agricole	84
Tableau 4: Interprétation des β des équations d'un modèle mixte.....	95
Tableau 5: Caractéristiques sociodémographiques et de mode de vie par quintile d'émissions de gaz à effet de serre des régimes dans un échantillon redressé de la cohorte NutriNet-Santé, 2014 (N=34193) ¹	100
Tableau 6: Quantités moyennes consommées par quintile d'émissions de gaz à effet de serre des régimes d'un échantillon redressé de volontaires de la cohorte NutriNet-Santé, 2014 (N=34193) ¹ .	101
Tableau 7: Indicateurs nutritionnels par quintile d'émissions de gaz à effet de serre des régimes d'un échantillon redressé de volontaires de la cohorte NutriNet-Santé, 2014 (N=34193) ¹	103
Tableau 8: Indicateurs environnementaux et de prix par quintile d'émissions de gaz à effet de serre des régimes d'un échantillon redressé de volontaires de la cohorte NutriNet-Santé, 2014 (N=34193) ¹	104
Tableau 9: Présentation des indicateurs de durabilité utilisés comme variables réponses pour cette analyse.....	108
Tableau 10: Pourcentage des variations expliquées par les deux premiers facteurs extraits de la RRR des consommations par groupe d'aliments et des indicateurs de la durabilité et coefficients de corrélation de Pearson (extrait d'un échantillon N=29413).....	110
Tableau 11: Moyennes des variables réponses incluses dans la RRR présentées par cluster et pour l'échantillon total, NutriNet-Santé, 2014 (extrait d'un échantillon N=29413) ¹	111
Tableau 12: Caractéristiques sociodémographiques et de mode de vie des participants par cluster, NutriNet-Santé, 2014, (N=29413) ¹	112
Tableau 13: Indicateurs d'évaluation de la durabilité des régimes alimentaires recueillis dans la littérature, choix de leur inclusion ou exclusion dans la construction du SDI et transformations potentielles.....	120
Tableau 14: Description des indicateurs et de la procédure de calcul du SDI (Sustainable Dietary Index).....	123
Tableau 15: SDI (sustainable Diet Index), sous indices, et indicateurs de durabilité par quintile de SDI, et corrélation (coefficient de Pearson) ¹ , NutriNet-Santé, 2014 (N=29388).....	127
Tableau 16: SDI et SDI modifié par quintile de SDI, étude des corrélations (coefficient de Pearson) et du classement (coefficient pondéré de Kappa), NutriNet-Santé, 2014 (N=29388)	127
Tableau 17: Différence relative de la consommation des groupes d'aliments, entre les quintiles de SDI extrêmes, NutriNet-Santé 2014 (N=29388) et entre les assiettes de différents scénarios de transition vers des régimes plus durables et la moyenne des consommations (INCA 2).....	128

Tableau 18: Caractéristiques sociodémographiques et de modes de vie entre quintiles de SDI ¹ (Sustainable Diet Index), NutriNet-Santé, 2014 (N=29388)	129
Tableau 19: Caractéristiques sociodémographiques et de mode de vie au début du suivi par quintile sexe spécifique de SDI (Q), NutriNet-Santé ¹ (N=20298), 2014, France	140
Tableau 20: Consommations moyennes des groupes d'aliments par quintile de SDI ¹ (N=20295), NutriNet-Santé, 2014, France.....	141
Tableau 21: Association entre évolution de la masse corporelle et quintile sexe spécifique (Q) de SDI, NutriNet-Santé (N=20295), 2014-2018, France	142
Tableau 22: Associations prospectives entre les quintiles sexe-spécifiques (Q) de SDI et le risque d'obésité et de surpoids, NutriNet-Santé, 2014-2018, France	143
Tableau 23: Caractéristiques sociodémographiques et de modes de vie par quintile sexe spécifique de SDI (Q), NutriNet-Santé (N=25589), 2014, France ¹	150
Tableau 24: Consommations des groupes d'aliments par quartile sexe spécifique de SDI ¹ (N=25589), NutriNet-Santé, 2014, France.....	151
Tableau 25: Associations prospectives entre le SDI et le risque de maladie cardiovasculaire, de cancer, ou l'un des deux, NutriNet-Santé (N=25589), 2014-2018, France	152
Tableau 26: Comparaison des associations avec la santé entre les quatre sous-scores et le SDI par la méthode de Chiuve, NutriNet-Santé, 2014-2018, France.....	158
Tableau 27: Contraintes nutritionnelles appliquées lors de l'optimisation	163
Tableau 28: Répartition des items dans les groupes et sous-groupes d'aliments	164
Tableau 29: Caractéristiques sociodémographiques et de modes de vie des participants (N=12166) par tertile de score provegetarien ¹ , NutriNet-Santé 2014.....	169
Tableau 30: Caractéristiques des régimes ¹ observés, après l'étape 0 et l'étape 1 pour la population totale (N=12166) et par tertile, NutriNet-Santé 2014.....	171
Tableau 31: Caractéristiques des régimes ¹ après l'étape 2 dans les 5 scénarios (N=12166), NutriNet-Santé 2014.....	174
Tableau 32: Caractéristiques des régimes optimisés et par scénario après la dernière étape d'optimisation (étape 3), NutriNet-Santé 2014, (N=12166)	176
Tableau 33: Synthèse des principaux résultats de cette thèse et de leurs points de discussion.....	185
Tableau 34: Recommandation nutritionnelle et d'alimentation durable de l'Allemagne, le Brésil, la Suède et le Qatar (Source : FAO, 2016).....	188

Table des figures

Figure 1: Les principaux systèmes alimentaires (source Mond'alim 2030)	21
Figure 2: Dynamiques des taux d'extinctions dans différents groupes de vertébrés depuis le 16ème siècle (Ceballos et al, 2015)	26
Figure 3: Échelle de mesure de l'insécurité alimentaire fondée sur les expériences (la FIES) (source : division statistique de la FAO)	31
Figure 4: Toile causale de l'obésité (adaptation de Ritembaugh)	34
Figure 5: Parts attribuées aux principaux facteurs de risque au DALYs (Disability-adjusted life-years) (source: GBD 2015)	36
Figure 6: Systèmes alimentaires et santé (TEEBAgriFood, 2018)	37
Figure 7: Différentes typologies de la durabilité (Boutaud 2014)	44
Figure 8: Indicateurs par sous-score du SNS (Gustafson, 2016)	54
Figure 9: Quantités des différents groupes alimentaires en fonction de la diminution des impacts environnementaux (pReCiPe) imposée dans l'optimisation et courbe de pénalité pour les hommes hollandais de 31 à 50 ans (Kramer, 2017)	57
Figure 10: Différences de consommation entre les régimes alimentaires actuels en 2016 et le régime de référence	63
Figure 11 : Contribution relative des groupes d'aliments selon les quintiles d'émissions de gaz à effet de serre des régimes, au sein de la cohorte de volontaires NutriNet-Santé, 2014 (N=34193)	102
Figure 12: Distinction dans les consommations des groupes d'aliments par clusters, NutriNet-Santé, 2014 (N=29413) ¹	113
Figure 13: Contribution (en% de g) des groupes d'aliments dans les trois meilleurs régimes obtenus par les approches mises en œuvre lors de la thèse	135
Figure 14: Schéma du processus d'optimisation	167
Figure 15: Structure moyenne des régimes observés, NutriNet-Santé 2014 (N=12166)	172
Figure 16: Structure moyenne des régimes après l'étape 0, NutriNet-Santé (N=12166)	173
Figure 17: Structure moyenne des régimes après l'étape 1, NutriNet-Santé (N=12166)	173
Figure 18: PANDiet, prix, densité énergétique, contribution du bio, pReCiPe et rapport protéique observé et optimisé pour les 5 scénarios et selon les tertiles de score provégétarien	175
Figure 19: Structure des régimes observés et après l'étape 3 selon 5 scénarios par tertile de score provégétarien	177
Figure 20: Ratio des aliments issus de l'agriculture biologique en fonction du pReCiPe du régime obtenu après l'étape 3 dans les 5 scénarios et dans le régime observé	178

Abréviations

ACP Analyse en Composante Principale

ACV Analyse de Cycle de Vie

ADEME Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

AMAP Association pour le Maintien d'une Agriculture Paysanne

ANCOVA Analyse de la Covariance

ANSES Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du travail

ANR Agence Nationale de la Recherche

CCITRS Comité consultatif sur le traitement de l'information en matière de recherche

CE Commission Européenne

CNIL Commission nationale de l'informatique et des libertés

CH₄ Méthane

CO₂ Dioxyde de Carbone

DALYs Perte d'année de vie en bonne santé

DASH Régime de réduction de l'hypertension artérielle

EFSA Autorité Européenne de Sécurité Sanitaire

FAO Organisation des Nations Unis pour l'agriculture et l'alimentation

FFQ-Bio Questionnaire d'évaluation des consommations alimentaires par fréquence biologique

ISO Organisation internationale de normalisation

IPBES Plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques

INCA Étude individuelle nationale des consommations alimentaires

Ind Individu

INRA Institut National de la recherche agronomique

INSEE Institut National de la statistique et des études économiques

INSERM Institut national de la santé et de la recherche médicale

IPAQ Questionnaire International sur l'Activité Physique

GBD Charge Globale des Maladies

GES Gaz à effet de serre

GIEC Groupe d'Experts International sur l'évolution du climat

HCSP Haut Conseil de Santé Publique

HTLM HyperText Markup Langage

HFSSM Échelle de mesure de la sécurité alimentaire des ménages

IMC Indice de Masse corporelle

LMR Limite Maximale de Résidus

MAR Taux Moyen d'adéquation

MER Taux Moyen d'excédent

MSY Totaux Maximum Durables

mPNNS-GS Score modifié d'adéquation avec les recommandations du Programme National Nutrition Santé

NAD Boissons chaudes ou non sucrés

N₂O Protoxyde d'Azote

Obs Observé

OMS Organisation Mondiale de la Santé

PANDiet score d'évaluation de la probabilité d'adéquation avec les recommandations en nutriments

PNNS Programme National Nutrition Santé

PRG Potentiel de Réchauffement Global

Q quintile

RCS fonction spline cubique restreinte

RRR Régression des rangs réduits

SDI Index de durabilité des régimes

SNIRAM Système national d'information inter régimes de l'Assurance maladie

WWF Fond pour la vie sauvage

Production scientifique

Publications

Faisant l'objet du travail de thèse

➤ Publiés

Seconda L, Baudry J, Allès B, Boizot-Szantai C, Soler L-G, Hercberg S, Langevin B, Lairon D, Pointereau P, Kesse-Guyot E (2018) Comparing nutritional, economic, and environmental performances of diets according to their levels of greenhouse gas emissions. *Climatic Change* 148, 155-172.

Seconda L, Baudry J, Allès B, Soler L-G, Hercberg S, Langevin B, Pointereau P, Lairon D, et Kesse-Guyot E. (2018) Identification of sustainable dietary patterns by a multicriteria approach in the NutriNet-Santé cohort. *Journal of Cleaner Production* 196, 1256-1265.

Seconda L, Baudry J, Pointereau P, Lacour C, Langevin B, Hercberg S, Lairon D, Allès B, et Kesse-Guyot E. (2019) Development and validation of an individual sustainable diet index in the NutriNet-Santé study cohort. *British Journal of Nutrition*, 1-12.

➤ Soumis

Seconda L, Egnell M, Julia C, Touvier M, Hercberg S, Pointereau P, Lairon D, Allès B, et Kesse-Guyot E. Association between sustainable dietary patterns and body weight and obesity risk in the NutriNet-Santé prospective cohort. *American Journal of Clinical Nutrition*, *in press*.

Seconda L, Baudry J, Allès B, Touvier M, Hercberg S, Pointereau P, Lairon D, et Kesse-Guyot E. Prospective associations between sustainable dietary pattern assessed with the Sustainable Diet Index (SDI) and risk of cancer and cardiovascular diseases in the French NutriNet-Santé cohort. *European Journal of Epidemiology*.

Autres publications

Seconda L, Baudry J, Allès B, Hamza O, Boizot-Szantai C, Soler L-G, Galan P, Hercberg S, Lairon D et Kesse-Guyot E. (2017) Assessment of the sustainability of the Mediterranean diet combined with organic food consumption: an individual behaviour approach. *Nutrients* 9, 61–76.

Seconda L., Péneau S, Bénard M, Allès B, Hercberg S, Galan P, Lairon D, Baudry J, et Kesse-Guyot E. (2017) Is organic food consumption associated with life satisfaction? A cross-sectional analysis from the NutriNet-Santé study. *Preventive Medicine Reports* 8, 190-196.

Lacour C, Seconda L, Allès B, Hercberg S, Langevin B, Pointereau P, Lairon D, Baudry J, et Kesse-Guyot E. (2018) Environmental impacts of plant-based diets: how does organic food consumption contribute to environmental sustainability? *Frontiers in Nutrition* 5:8.

Baudry J, Assmann K, Touvier M, Allès B, Seconda L, Latino-Martel P, Ezzedine K, Galan P, Hercberg S, Lairon D et Kesse-Guyot E. (2018) Association of frequency of organic food consumption with cancer risk findings from the NutriNet-Santé prospective cohort study. *JAMA international Medicine* 178(12):1597–1606.

Baudry J, Pointereau P, Seconda L, Vidal R, Taupier-Letage B, Langevin B, Allès B, Galan P, Hercberg S, Amiot M-J, Boizot-Szantai C, Hamza O, Cravedi J-P, Debrauwer L, Soler L-G, Lairon D, et Kesse-Guyot E. (2019) Improvement of diet sustainability with increased level of organic food in the diet: findings from the BioNutriNet cohort. *American journal of clinical nutrition* 109:1173–1188.

Egnell M, Seconda L, Neal B, Ni Mhurchu C, Rayner M, Jones A, Touvier M, Kesse-Guyot E, Hercberg S, Julia C. (2019) Prospective associations of the original Food Standards Agency nutrient profiling system and three variants with weight gain, overweight and obesity risk: results from the French NutriNet-Santé cohort. *Soumis à l'International Journal of obesity*.

Rabès A, Seconda L, Langevin B, Allès B, Touvier M, Hercberg S, Lairon D, Baudry J, Pointereau P, et Kesse-Guyot E. (2019) Environmental impacts associated with diets including various degrees of animal-based foods consumption.

À vocation de transfert

Pointereau P (2019) *Le revers de notre assiette Changer d'alimentation pour préserver notre santé et notre environnement*. Editions Solagro.

Communications

Orales

Seconda L*, Baudry J, Allès B, Soler L-G, Hercberg S, Langevin B, Pointereau P, Lairon D, et Kesse-Guyot E. Journées Francophones de Nutrition. Nantes, Décembre 2017. Identification de profils alimentaires durables par une méthode exploratoire dans la cohorte NutriNet-Santé.

Lacour C, Seconda*L, Allès B, Hercberg S, Langevin B, Pointereau P, Lairon D, Baudry J, et Kesse-Guyot E. Journées Francophones de Nutrition. Nantes, Décembre 2017. Étude des impacts environnementaux des régimes, caractérisés par un score provégétarien et par la consommation de produits issus de l'agriculture biologique.

Seconda L, Baudry J, Allès B, Soler L-G, Hercberg S, Langevin B, Pointereau P, Lairon D, et Kesse-Guyot E. International Sustainable Production and consumption Conference. Manchester, Octobre 2018. Identification of sustainable dietary patterns by a multicriteria approach in the NutriNet-Santé cohort.

Affichées

Seconda L, Baudry J, Allès B, Hamza O, Boizot-Szantai C, Soler L-G, Galan P Galan P, Hercberg S, Lairon D* et Kesse-Guyot E. 1st world conference on the Mediterranean Diet. Milan, Juillet 2016.

Sustainability of organic and Mediterranean diets: an approach based on individual behaviors.

Seconda L*, Baudry J, Allès B, Hamza O, Boizot-Szantai C, Soler L-G, Galan P, Hercberg S, Lairon D et Kesse-Guyot E. Journées Francophones de Nutrition. Montpellier, Novembre 2016. Evaluation de la durabilité des régimes méditerranéens combinés avec la consommation de produits biologiques : une approche comportementale et individuelle

Seconda L, Baudry J, Allès B, Boizot-Szantai C, Soler L-G, Hercberg S, Langevin B, Lairon D, Pointereau P, Kesse-Guyot E. Journées Francophones de Nutrition. Nantes, Décembre 2017. Comparaison de régimes alimentaires observés sur des critères nutritionnels, économiques et environnementaux en fonction de leur niveau d'émission de gaz à effet de serre.

Seconda L, Baudry J, Pointereau P, Lacour C, Langevin B, Hercberg S, Lairon D, Allès B, et Kesse-Guyot E. Journées Francophones de nutrition. Nice, Novembre 2018. Développement et validation d'un index évaluant la durabilité des régimes alimentaires au sein de la cohorte NutriNet-Santé : projet BioNutriNet

Seconda L, Egnell M, Julia C, Touvier M, Hercberg S, Pointereau P, Lairon D, Allès B, et Kesse-Guyot E. Journées Francophones de nutrition. Nice, Novembre 2018. Association prospective entre les comportements alimentaires durables évalués par l'index générique de durabilité des régimes (SDI), la prise de masse corporelle et le risque d'obésité dans la cohorte NutriNet-Santé.

Préambule

« L'Humanité s'est humanisée à travers sa table en imposant entre elle-même et ce qu'elle mange et boit toute une série de choix, de valeurs, d'objets, de savoirs et de savoir-faire, de culture, de rituels, transformant ainsi les nutriments, qui concernent le seul corps biologique, en aliment. [...] L'humanité pourrait tout aussi bien se déshumaniser en déshumanisant sa table. Nous n'avons toujours pas appris, en plusieurs millénaires, à garantir le droit au banquet à l'ensemble de l'humanité [...]. Notre siècle ne fait pas exception : son principal défi n'est pas la conquête spatiale, mais de savoir comment nourrir 8 milliards d'humains sans détruire les écosystèmes. »¹

Préoccupée par le défi de garantir une alimentation de qualité pour toutes et tous, y compris aux prochaines générations, j'ai choisi de réaliser cette thèse dont l'objectif était d'évaluer les impacts de notre alimentation sur l'environnement et la santé et d'identifier des freins et des leviers à une alimentation plus durable, selon la définition proposée en 2010 par la FAO (Organisation des Nations unies sur l'agriculture et l'alimentation).

Cette thèse d'épidémiologie et de santé publique s'appuie sur les données de volontaires engagés dans la cohorte NutriNet-Santé créée il y a tout juste dix ans, et dont l'objectif est de recueillir des données pour étudier de manière prospective les liens entre l'alimentation, l'activité physique et la santé. En 2014, l'équipe a coordonné le projet BioNutriNet, afin de collecter et d'analyser des données sur la consommation et la production en agriculture biologique. Les données de ce projet nous ont permis en particulier de faire des liens entre la production agricole, la consommation et la santé. Ces liens, bien que soupçonnés, étaient peu évalués, à cause du manque de données.

J'ai donc eu la chance de travailler sur ces données pour répondre à l'objectif principal de la thèse. Pour cela, avec l'aide de ma directrice de thèse et de nombreux spécialistes, j'ai commencé à identifier au sein de l'échantillon de volontaires, les comportements alimentaires les plus durables, selon des indicateurs sélectionnés. Dans un second temps, j'ai cherché à évaluer les associations entre ces comportements alimentaires et plusieurs indicateurs de l'état de santé. Enfin, par le développement d'une méthode d'optimisation, j'ai cherché des solutions de régimes alimentaires optimaux pour l'environnement, les plus acceptables possible et répondant aux besoins nutritionnels.

¹ Paul Ariès, Une histoire politique de l'alimentation du paléolithique à nos jours. 2016, Ed : Max Milo L'inconnu

Dans la première partie de ce manuscrit de thèse, je décris les principaux enjeux des systèmes alimentaires et l'état des connaissances en épidémiologie sur la durabilité des régimes alimentaires. La seconde partie précise les objectifs spécifiques et les questions de recherche de cette thèse, alors que la troisième partie présente la méthodologie générale appliquée dans les différentes études.

La partie centrale du manuscrit de thèse reprend les principaux résultats et leurs interprétations. Elle a été divisée en trois parties : une première partie sur les travaux d'identification de régimes alimentaires plus durable, une seconde sur les associations avec les principaux événements de santé et une dernière présentant les résultats d'optimisation.

Enfin, ce manuscrit de thèse inclut une discussion générale permettant de résumer et de remettre les principales informations à tirer de ces travaux dans le contexte actuel, discuter leurs limites et perspectives.

I- Introduction et état de l'art

1) De nombreuses critiques des systèmes alimentaires actuels

Dans cette première partie, nous citerons les principales raisons de la non-durabilité du système alimentaire global, sans en donner une liste exhaustive, mais en présentant celles qui sont bien documentées et à l'origine des réflexions sur la durabilité des régimes alimentaires. Les systèmes alimentaires peuvent être définis comme « la manière dont les hommes s'organisent dans l'espace et dans le temps pour obtenir et consommer leur nourriture » (1). Ils sont donc multiples, bien que les interactions, recombinaisons et hybridations entre eux forment un système alimentaire global. D'ailleurs plusieurs typologies des systèmes alimentaires ont été proposées. Parmi ces systèmes, les systèmes alimentaires agroindustriels se caractérisent par : « une logique fondamentale de maximisation de profit des firmes agro-industrielles et des distributeurs, grâce au développement d'économie d'échelle technologique ou commerciale. Il vise à produire des aliments à prix réduit et à assurer une qualité standardisée et régulière, pour des marchés de masse, en s'appuyant sur des processus de spécialisation des zones de production et en respectant des réglementations nationales et internationales. Les systèmes alimentaires agroindustriels reposent sur des principes de décomposition/recomposition des produits agroalimentaires et sont à l'origine de distanciations géographique, économique et cognitive entre le producteur et le consommateur » (2).

Les systèmes alimentaires agro-industriels représentent entre 45 et 50% de l'alimentation mondiale, ils ne sont pas majoritaires, mais très importants. En France, les systèmes alimentaires agro-industriels sont prédominants (76% selon la Figure 1) malgré le maintien et le développement de systèmes alimentaires plus traditionnels ou alternatifs (3).

Dans cette première partie d'introduction, nous évoquerons les critiques des systèmes alimentaires agro-industriels. Néanmoins, lorsque cela sera nécessaire et justifié, nous soulèverons des critiques concernant les autres systèmes inclus dans le système alimentaire global. En effet, nous verrons que la coexistence de systèmes alimentaires différents, mais interdépendants fait naître des inégalités sociales et montre des incohérences environnementales. À noter également que nous adopterons une vision occidentale, plutôt française, car les résultats de la thèse s'appuient dans un contexte français.

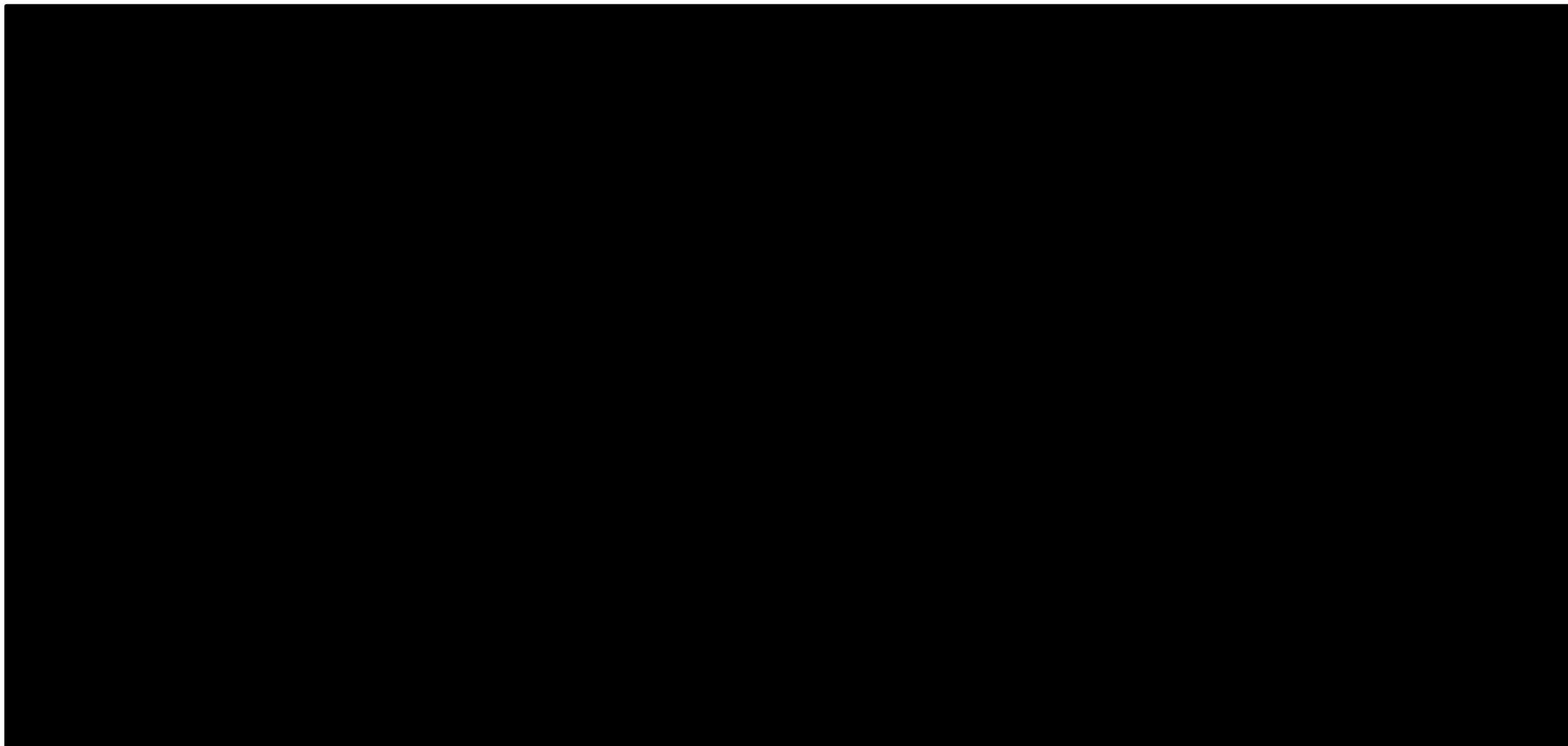


Figure 1: Les principaux systèmes alimentaires (source Mond'alim 2030)

a/ Pour des raisons environnementales

Contribution aux changements climatiques

D'après le dernier rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), la température moyenne à la surface de la Terre a augmenté d'environ 1,0°C depuis l'époque préindustrielle (4). Le GIEC conclut avec une certitude à 95% que les activités humaines sont la première cause de l'élévation rapide de la température moyenne terrestre. De nombreuses activités humaines (chauffage, agriculture, transport, etc.) émettent des gaz à effet de serre dans l'atmosphère de manière significative. La vapeur d'eau, le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O), l'ozone et d'autres gaz industriels (hydrocarbures halogénés) ont la particularité d'absorber le rayonnement infrarouge émis à la surface de la terre et d'en redistribuer sous la forme de radiations au sein de l'atmosphère terrestre : ce sont donc des gaz à effet de serre.

L'ensemble des émissions directes des activités agricoles et alimentaires représente entre 11 et 15% de l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre (5). En particulier, le méthane est émis par les activités d'élevage (fermentations entériques des ruminants) ainsi que dans une moindre mesure par la riziculture irriguée (6,7). La production d'engrais de synthèse et les effluents d'élevage sont à l'origine d'émissions de protoxyde d'azote (6,7). Le pouvoir réchauffant de ces deux gaz est très élevé, en comparaison de celui du dioxyde de carbone, mais leurs émissions se cantonnent à quelques activités. À l'inverse, les émissions de dioxyde de carbone sont présentes à toutes les étapes de production et de consommation alimentaire, ce qui constitue au total une quantité de gaz non négligeable (8). De manière plus anecdotique, les gaz de refroidissement utilisés pour le transport en milieu froid, le refroidissement ou la congélation contribuent aussi à l'effet de serre.

Des émissions de gaz à effet de serre indirectes sont également attribuables aux activités agricoles, notamment celles en lien avec la déforestation. En effet, les forêts sont des puits de récupération du dioxyde de carbone par les activités photosynthétiques des végétaux, et le stockage de carbone dans les sols. En nous privant des forêts, nous contribuons à augmenter le dioxyde de carbone dans l'atmosphère qui n'est plus capté. Ainsi, la déforestation est responsable d'environ un quart des émissions de gaz à effet de serre (5).

La contribution aux changements climatiques des systèmes alimentaires dépend de la culture et du modèle de production. L'élevage contribuerait en moyenne pour moitié à l'ensemble des émissions des activités agricoles (5). Les quantités de gaz à effet de serre varient selon les méthodes d'élevage. Certains leviers techniques peuvent contribuer à réduire les contributions aux changements

climatiques de la production de viande, d'œuf ou des produits laitiers, comme favoriser les systèmes en pâturage sur des terres non utilisables pour d'autres productions, limiter l'usage d'engrais de synthèse, modifier les rations alimentaires pour les animaux ou mieux gérer les effluents d'élevage (7,9). Néanmoins, ces solutions ne seront pas suffisantes pour répondre aux objectifs d'atténuation du changement climatique fixés lors de l'accord de Paris en 2015 (7). Et ce, d'autant plus que certaines de ces solutions de réduction des émissions de gaz à effet de serre des activités agricoles apparaissent finalement contre-productives (7) : le bilan environnemental des agro-carburants, par exemple, est très mitigé si on considère les émissions de gaz à effet de serre du changement d'affectation des sols (10).

Au final, la contribution des systèmes alimentaires aux changements climatiques est importante, mais également variable selon les modèles de production et de consommation. Les systèmes alimentaires agro-industriels, en promouvant l'élevage industriel² et la consommation de produits d'origine animale ou en incitant à la production d'aliments standards et constants (hors saison), contribuent bien plus à l'élévation de la température moyenne que d'autres systèmes alimentaires.

L'augmentation de la température moyenne entraîne une augmentation en nombre et en intensité des accidents climatiques (ex : canicule, inondation ou tornade). La fonte des glaces terrestres ainsi que la dilatation de l'eau entraînent une élévation du niveau de la mer et parfois la submersion de certains espaces côtiers (4). Ces perturbations climatiques ont déjà des répercussions sur les populations humaines : migrations climatiques (11), insécurité alimentaire (12), conflits (13). En ce qui concerne l'alimentation, une projection montre que la disponibilité alimentaire par personne diminuerait de 3,2% à cause des changements climatiques d'ici 2050 (14). Ainsi, les moyens de s'adapter font maintenant partie des préoccupations et des négociations sur le changement climatique. Le GIEC définit l'adaptation comme la démarche d'ajustement au climat actuel ou attendu, ainsi qu'à ses conséquences. Il s'agit donc d'atténuer ou d'éviter les effets préjudiciables et d'exploiter les effets bénéfiques des modifications du climat.

Les études scientifiques sur les capacités d'adaptation aux changements climatiques des différents systèmes de production montrent que la résilience des systèmes agro-industriels est faible (15). En effet, ces systèmes utilisent peu les principes de l'agro-écologie, c'est-à-dire des pratiques cherchant à optimiser les processus écologiques permettant de limiter l'usage d'intrants à travers la fourniture

² L'élevage industriel est une forme d'élevage qui vise à augmenter sensiblement la productivité de cette activité, notamment en raccourcissant la phase de croissance des animaux, et en s'affranchissant plus ou moins fortement du milieu environnant.

d'une diversité de services écosystémiques. Ils sont de plus basés sur la monoculture, ou mono-élevage, d'espèces ou de races sélectionnées pour être performantes dans des conditions pédoclimatiques (ensemble des caractères du climat local et des sols) bien déterminées, limitant ainsi leur capacité d'adaptation (15).

Pour résumer, les systèmes alimentaires et en particulier agro-industriels sont responsables d'une partie importante des émissions de gaz à effet de serre contribuant aux changements climatiques. Ils présentent également d'importantes limites pour s'adapter aux variations climatiques déjà observables aujourd'hui.

Dépendance et épuisement des ressources

L'agriculture utilise une grande diversité de ressources pour en produire d'autres. Nous présenterons par la suite les principales ressources utilisées pour l'alimentation : le sol, les énergies fossiles, l'eau et les roches phosphatées en appuyant sur notre dépendance et leur caractère épuisable.

Les sols sont une des ressources indispensables à l'agriculture : la surface mondiale est occupée à 38% par des activités agricoles. Cette ressource est limitée à la fois par la superficie de la Terre, mais aussi par la présence de zones faiblement anthropisables (montagnes, déserts, ou toundras). Actuellement, l'intensification des activités agricoles, accompagnée par celles des industries minières et l'urbanisation sont en cause dans la contamination et l'érosion des sols les rendant infertiles (16).

Les systèmes alimentaires agro-industriels dépendent également de ressources fossiles (gaz, pétrole et charbon) qui, malgré le développement d'autres sources d'énergie, représentent toujours environ 80% de l'énergie primaire dans le monde (17). Les ressources fossiles sont utilisées soit directement, comme carburants pour les machines ou comme combustibles pour les serres et bâtiments, soit indirectement pour l'élaboration des intrants ou la fabrication du plastique qui serviront à la production alimentaire.

L'agriculture est sans conteste le secteur d'activité le plus consommateur d'eau douce, environ 70% des consommations mondiales (18). En France, environ 60% de l'eau prélevée pour l'agriculture est utilisée pour l'irrigation (19). L'irrigation permet d'augmenter les rendements et l'étendue temporelle de la saisonnalité de certaines cultures. Les quantités d'eau douce disponibles ne cessent de chuter dans le monde. D'après la FAO, il faut entre 2000 et 5000 litres d'eau pour produire l'alimentation quotidienne et répondre aux besoins journaliers en eau de boisson et d'assainissement d'une

personne. Aujourd'hui 21 pays dans le monde font face à une situation de rareté absolue des ressources en eau (moins de 1400 litres/jour/personne disponibles) (20).

Une quatrième ressource naturelle fortement mobilisable par les systèmes agro-industriels est la roche phosphatée, utilisée pour la fabrication d'engrais riches en phosphore. Environ 90% de cette ressource sert aux activités agricoles. Il existe un consensus pour dire que les réserves devraient être épuisées d'ici à 2150 (21). De plus, ces réserves sont contrôlées à plus de 85% par seulement trois pays : le Maroc, suivi de loin par les États-Unis et la Chine, rendant leur utilisation dépendante des tensions géopolitiques avec ces trois pays (21).

La disponibilité de ces quatre ressources diminue pour plusieurs raisons. La première réside dans le fait que le rythme de leur consommation est supérieur à celui de leur renouvellement. C'est notamment le cas pour les ressources fossiles. Une estimation révèle que la moitié des réserves de pétrole et le tiers de celles de gaz seront consommés en 2020. Les réserves de gaz permettront juste d'atteindre 2050, alors que celles de pétrole seront insuffisantes. Seul le charbon, qui est le plus fort émetteur à la fois de CO₂ et de polluants, offre des réserves pour plusieurs siècles (22).

La seconde raison de la diminution des ressources disponibles est liée à la pollution. Par exemple pour l'eau, les fertilisants utilisés massivement engendrent souvent des phénomènes d'eutrophisation, caractérisés par une asphyxie des milieux aquatiques suite à un développement trop important de certaines algues. La concentration des activités d'élevage sur une même zone entraîne un excédent de déjections animales par rapport à la capacité d'absorption des terres agricoles. Ainsi, ces déjections, sous l'effet du ruissellement de l'eau et de l'infiltration dans le sous-sol, enrichissent les cours d'eau et nappes phréatiques en azote et constituent également une source de pollution bactériologique. Enfin, l'utilisation soutenue des produits phytosanitaires associée à la disparition des haies autour des cultures entraîne le rejet de produits phytosanitaires dans les milieux naturels et en particulier les cours d'eau.

La troisième raison relative à la diminution des ressources repose sur la limitation des extractions. Afin de respecter les limites planétaires, il est en effet préconisé de ne pas utiliser entièrement certaines ressources. En particulier, il est maintenant connu que pour maintenir l'augmentation de la température moyenne sur Terre en dessous de 2°C par rapport à l'ère préindustrielle, il est nécessaire de conserver 33% des réserves mondiales en pétrole, 50% des réserves en gaz naturel et 80% des réserves en charbon (23). De même, afin de maintenir certains écosystèmes, il est important que le débit d'eau des rivières soit suffisamment important.

Enfin, la disponibilité des ressources naturelles est également dépendante des variations climatiques, de la conjoncture économique ou encore des situations géopolitiques (21).

Finalement, les systèmes alimentaires ont été et sont toujours dépendants de nombreuses ressources naturelles. Nous avons montré que les systèmes alimentaires agro-industriels actuels nécessitent beaucoup trop de ressources naturelles (par rapport au rythme de renouvellement) et sont à l'origine de nombreuses pollutions questionnant fortement la capacité des générations futures à bénéficier de ces ressources pour répondre à leurs besoins. Des stratégies d'action pour les conserver sont proposées. On peut citer par exemple l'agriculture de précision pour économiser l'eau ou limiter l'usage de produits de synthèse, ou une meilleure gestion et valorisation des déchets. Néanmoins, toutes ces stratégies doivent faire l'objet d'une évaluation multicritère pour éviter le transfert de pression d'une ressource vers une autre ou des effets rebonds (21).

Extinction massive de la biodiversité

La biodiversité se définit comme la diversité de la vie sur terre, en considérant celles des écosystèmes, des espèces et des gènes dans l'espace et dans le temps. Depuis plusieurs années, nous vivons la sixième extinction de masse de la biodiversité (24), la précédente étant celle des dinosaures, il y a environ 65 millions d'années. L'extinction actuelle se traduit par la disparition accélérée d'un grand nombre d'espèces et l'effondrement des populations de certaines espèces restantes. Selon le rapport de la plate-forme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES), le quart des espèces animales et végétales évaluées sont menacées de disparition (25).

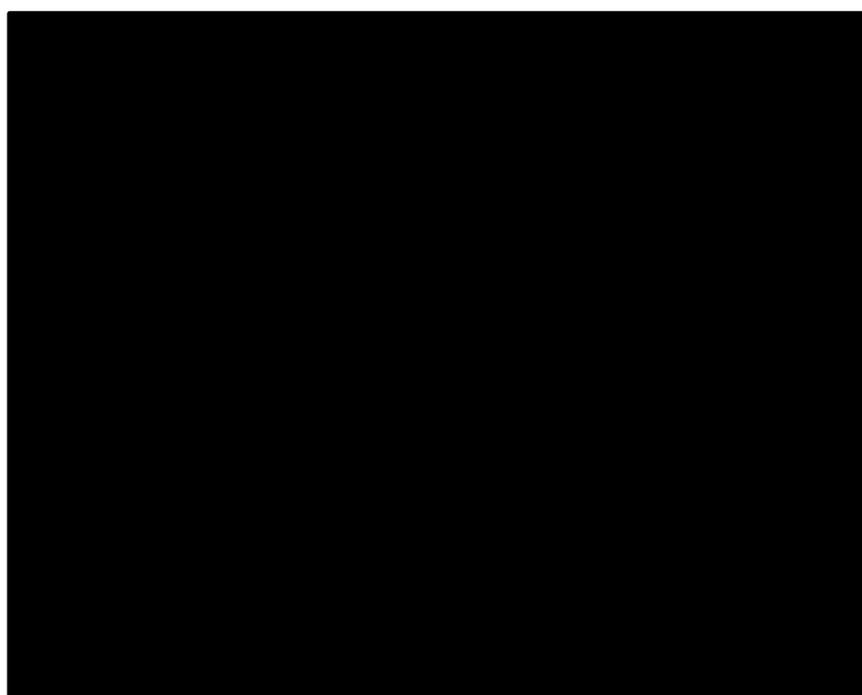


Figure 2: Dynamiques des taux d'extinctions dans différents groupes de vertébrés depuis le 16ème siècle (Ceballos et al, 2015)

Pour illustration, la Figure 2 présente les dynamiques d'extinctions de différents groupes de vertébrés (plus documentés que d'autres groupes) depuis le 16^{ème} siècle. Le taux d'extinction des mammifères a plus que quadruplé et celui des oiseaux a été multiplié par 10 depuis 1500 (26). En particulier, on note une disparition très importante des oiseaux de campagnes (27), des insectes (il est prévu une extinction d'environ 40% des espèces d'insectes dans le monde) (28) ainsi que de la faune et la flore des sols (29).

Par extension, près d'un million d'espèces (sur un nombre total estimé autour de 10 à 15 millions) risquent de s'éteindre, dont beaucoup au cours des prochaines décennies. Le rythme des disparitions s'accélère, il serait des centaines de fois plus élevé que sur les dix derniers millions d'années (25). Toutes ses extinctions altèrent massivement le fonctionnement des écosystèmes et leur capacité à fournir les biens et services nécessaires à la prospérité des sociétés (3).

L'agriculture industrielle contribue à cette extinction massive par plusieurs mécanismes (30). L'intensification des méthodes de production et la simplification des écosystèmes (les open fields sont peut-être le meilleur exemple) détruisent les habitats des populations en place (31). Elle participe également à la diffusion de pollution, en particulier par l'usage de pesticides. En incluant des pathogènes ou en introduisant de nouvelles espèces dans un écosystème, elle participe à l'extinction d'autres espèces. Par sa contribution aux émissions de gaz à effet de serre, l'agriculture industrielle contribue aux changements climatiques menaçant la survie de certaines espèces (30). Enfin, les prélèvements actuels en mer de certains poissons et fruits de mer dépassent le seuil d'équilibre nécessaire au renouvellement des espèces marines (25).

Concernant les espèces cultivées et consommées, nous observons également une réduction de la diversité. En effet, selon la FAO il existerait entre 10 000 à 50 000 plantes comestibles alors que moins de 200 sont utilisées pour l'alimentation (32). La moitié des races animales européennes s'est éteinte au XX^{ème} siècle, et aujourd'hui un tiers sur les 770 races restantes dans le monde est en danger (32). Les nombreuses sélections d'espèces et de races, pour s'adapter à aux méthodes de production intensives, sont en partie en cause.

b/ Pour leur incapacité à nourrir convenablement le monde

Modifications alimentaires induites par l'industrialisation

Une profonde modification de la composition des régimes alimentaires

Dans la partie précédente sur l'extinction de la biodiversité, on a vu que l'homme cultive finalement peu d'espèces par rapport à la grande diversité qui lui serait accessible. Par exemple, seules trois céréales (le blé, le maïs et le riz) fournissent environ 60% des calories alimentaires consommées dans le monde (32). L'industrialisation de l'alimentation aurait accentué l'appauvrissement de la diversité des espèces cultivées et consommées (25). Schématiquement, les processus de transformation industrielle alimentaire reposent sur deux étapes : le fractionnement consistant à déstructurer la matière première agricole pour en extraire les composants élémentaires ou ingrédients et l'assemblage qui vise à reconstruire avec les composants de la première phase un aliment consommable, stable et standard pour le marché. Afin d'optimiser la phase de fractionnement, l'usage de matières premières réduites en nombre, en diversité et moins variables dans le temps a été recherché. L'optimisation de la première phase aurait ainsi permis une évolution des rapports de prix favorables aux produits transformés. De plus, afin de donner une impression de nouveauté, de nombreux investissements dans la recherche et le développement ont porté sur la seconde étape et ainsi proposé une grande variété de produits finis (33).

Ainsi, l'agro-industrie est parvenue à fournir de manière constante de nombreuses références de produits alimentaires de qualité constante à un prix bon marché. L'attention portée à la qualité sanitaire a éloigné les risques d'intoxication alimentaire, mais des critiques sur d'autres aspects qualitatifs, notamment nutritionnels, persistent. Par exemple, en utilisant la classification NOVA (34) (classification reconnue par la FAO et la « Pan American Health Organization » pour classer les aliments selon le degré de transformation alimentaire), des chercheurs ont montré que les aliments ultra-transformés, c'est-à-dire produits avec des formulations industrielles comportant plus de 4 ou 5 ingrédients, contiennent souvent moins de protéines, moins de fibres, de potassium, de magnésium et de vitamines A, B12, C et E, mais plus d'acides gras saturés, d'acides gras-trans, de sucres ajoutés, de sel et de calories (35–38). De plus, l'évolution des conditions de production et d'industrialisation des aliments au cours des dernières décennies a généré des écarts de prix grandissants entre les produits frais comme les fruits et légumes, dont le prix a globalement augmenté, et les produits transformés incorporant matières grasses et sucres, dont le coût relatif a baissé (39).

L'amélioration des niveaux de vie et l'urbanisation, combinée à l'apparition massive d'aliments industrialisés bon marché, mais de qualité nutritionnelle moyenne ou issus de l'élevage intensif, ont

contribué à modifier la composition des régimes alimentaires. Ce phénomène porte le nom de transition nutritionnelle. Ce processus est décrit en deux étapes : on observe en premier lieu une augmentation quantitative de la consommation puis une modification de la structure des régimes (40). Par ce processus, les régimes alimentaires s'enrichissent en matières grasses, sucres simples, produits carnés et produits transformés et s'appauvrissent en glucides complexes. Bien que cette transition soit aboutie en France, une grande majorité de la population mondiale n'est aujourd'hui qu'au début de sa transition nutritionnelle. Des divergences à l'échelle des pays et des populations dans le déroulement de la transition nutritionnelle sont néanmoins à noter, notamment concernant la vitesse de transition. La transition nutritionnelle en France a commencé au 19^{ème} siècle et les deux étapes ont eu lieu l'une après l'autre, alors qu'en Chine les deux étapes se sont déroulées simultanément en 50 ans (3). Certaines habitudes culturelles résistent malgré tout à la transition nutritionnelle et à l'uniformisation des régimes. Par exemple, en Inde où la population a commencé sa transition, une grande partie de la population reste aujourd'hui encore végétarienne (3).

Ainsi, l'industrialisation de l'alimentation et l'élévation du niveau de vie conduisent les populations à modifier leur régime alimentaire de manière conséquente. L'étendue des modifications est soupçonnée jouer un rôle dans l'apparition et le développement de certaines formes de malnutritions et maladies chroniques (voir les chapitres suivants).

Une exposition accrue à des composés nocifs

Au-delà des modifications de leur structure, les aliments sont devenus une source d'exposition pour l'homme à des composés chimiques jusqu'ici peu présents. En effet, l'utilisation de pesticides de synthèse s'est largement répandue et intensifiée suite au développement des systèmes alimentaires agro-industriels (2). En population générale, l'alimentation serait la principale voie d'exposition à ces composés de synthèse (41,42). Plusieurs rapports montrent qu'une partie des aliments contient des résidus de pesticides, dont certains ont été classés comme cancérigènes probables par le Centre de Recherche International sur le Cancer. L'EFSA a analysé, en 2016, 84657 échantillons d'aliments et montre que 45,5% de ces échantillons contiennent des résidus, mais en dessous de la LMR (limites maximales de résidu) alors que 3,8% des échantillons sont au-dessus des limites (43). L'usage de certains additifs ajoutés lors des phases de transformation des aliments est aussi soupçonné de nuire à la santé (3).

Parmi les substances issues de leur production et retrouvées dans les aliments, certains sont des perturbateurs endocriniens, c'est-à-dire qu'ils possèdent des propriétés hormono-mimétiques (imitant l'action de certaines hormones) causant des anomalies physiologiques, et notamment

reproductives. Leurs effets seraient indépendants de la dose d'exposition, mais liés au temps d'exposition et aux effets combinés entre différents perturbateurs endocriniens, nommé effet cocktail (44,45). Ces effets cocktail sur la santé sont encore peu étudiés, mais il apparaît essentiel de les considérer dans les prochaines études afin d'évaluer leur impact (45).

Des modifications anxigènes

L'externalisation de la fonction de production alimentaire engagée par l'industrialisation de l'agriculture et de l'agroalimentaire contribue à créer une distanciation spatiale, temporelle et technologique croissante entre les consommateurs et la nourriture (46). Ces distanciations imposent aux consommateurs de faire confiance aux opérateurs des filières, mais cette confiance ne va pas de soi, car manger n'est pas sans risques. Fischler a effectivement expliqué que manger consiste à incorporer des aliments provenant de l'extérieur pour se construire au sens réel (croissance, renouvellement cellulaire...) et figuré (construire son identité).

La confiance nécessaire aux consommateurs pour choisir leurs aliments est aujourd'hui particulièrement ébranlée. Les nombreux scandales liés à des négligences ou malveillances d'acteurs des filières ont marqué les esprits, malgré la mise en place a posteriori d'actions pour éviter qu'ils se reproduisent. Par exemple, Estelle Masson nous explique que la crise de « la vache folle » n'a pas été uniquement fondée sur la peur de la transmissibilité de l'encéphalopathie spongiforme bovine, mais aussi par la découverte des pratiques mises en place par les industries de l'élevage (47). Les consommateurs pour la plupart ignoraient par exemple qu'on rendait carnivore, et même cannibale, une espèce herbivore. Cette pratique serait contraire à la morale et l'éthique d'un bon nombre de consommateurs, qui se sont alors sentis souillés de s'être nourris avec un aliment ne respectant pas leurs valeurs (47). Plus récemment la découverte de certaines méthodes d'abattage a choqué un grand nombre de consommateurs provoquant parfois des réactions radicales de rejets des aliments d'origine animale.

De nombreux sociologues ont également noté que la figure et la place du consommateur avaient changé ces dernières années : il est maintenant considéré comme un acteur central, chargé de nouvelles responsabilités (48). Aujourd'hui, les États privilégieraient des approches consistant par exemple à rajouter des informations sur les produits ou à créer de nouveaux labels. Sans plus d'engagements de leur part, ces approches font reposer les responsabilités des enjeux environnementaux, sociaux et de santé des systèmes alimentaires sur les choix des consommateurs (48). Le consommateur devient alors un acteur qui doit réguler les risques de sa consommation par lui-même, ce qui peut être particulièrement compliqué et angoissant (46).

Une sécurité alimentaire et nutritionnelle qui n'est pas garantie pour tous

On parle de sécurité alimentaire et nutritionnelle lorsque « tous les êtres humains ont, à tout moment, un accès physique, social et économique à une nourriture saine dont la quantité consommée et la qualité sont suffisantes pour satisfaire les besoins énergétiques et les préférences alimentaires des personnes, et dont les bienfaits sont renforcés par un environnement dans lequel l'assainissement, les services de santé et les pratiques de soins sont adéquats, le tout permettant une vie saine et active » (49). Ainsi, quatre grands piliers composent la sécurité alimentaire : la disponibilité, l'accès, l'utilisation et la stabilité des denrées. Si ces conditions ne sont pas réunies, on parle d'insécurité alimentaire. La prévalence de l'insécurité alimentaire est souvent évaluée au niveau mondial grâce à l'échelle de mesure de l'insécurité alimentaire fondée sur les expériences (la FIES), créée et validée par la FAO. Elle est composée de huit questions qui permettent de décrire les conditions et les comportements qui caractérisent les contraintes liées à l'accès aux aliments. Ainsi avec cette échelle, présentée en Figure 3, il est possible de définir plusieurs niveaux de gravité.

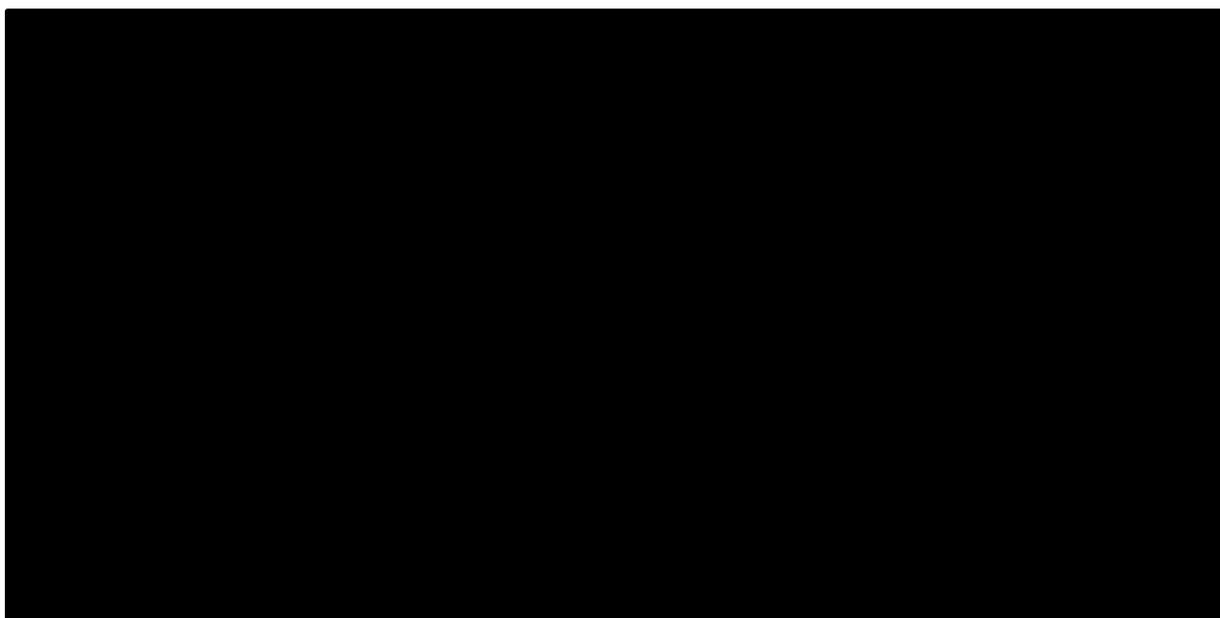


Figure 3: Échelle de mesure de l'insécurité alimentaire fondée sur les expériences (la FIES) (source : division statistique de la FAO)

Les chiffres de 2017 montrent une augmentation du pourcentage de personnes en insécurité alimentaire grave dans toutes les régions du monde par rapport à 2016, avec une nette augmentation en Afrique et en Amérique latine (50).

La guerre et les conflits sont les principaux déterminants de l'insécurité alimentaire grave. Néanmoins, l'organisation actuelle des systèmes alimentaires contribue également à ces insécurités

(51) par plusieurs mécanismes que nous présentons brièvement. L'accaparement des terres arables par des fonds d'investissement privés ou des multinationales contribue souvent à l'appauvrissement des populations locales les utilisant antérieurement pour se nourrir (52). De plus, l'exportation de produits agricoles des pays les plus riches à un prix inférieur à celui pratiqué dans le pays d'origine déstabilise les marchés locaux, notamment en Afrique (53). La tendance à la financiarisation des aliments de base est également mise en cause, car les spéculations boursières peuvent faire varier les prix indépendamment des grandes tendances du marché. Il est par exemple reconnu que ce sont en grande partie des bulles spéculatives qui ont induit les émeutes de la faim en 2008 (54,55). Les règles ont depuis été modifiées, mais des mesures restent nécessaires pour réduire les risques d'instabilité des cours (55). Enfin, la variabilité du climat et les événements climatiques extrêmes de plus en plus nombreux affectent les quatre piliers de la sécurité alimentaire (disponibilité, accès, utilisation et stabilité) (50).

L'insécurité alimentaire touche également les populations avec des petits budgets des pays industriels. En France, elle a été évaluée lors de l'enquête INCA3 à partir d'un questionnaire sur la perception de l'alimentation dans le ménage, le HFSSM (Household Food Security Survey Module). Les résultats montrent que 8,2% des ménages avec enfant vivent une insécurité alimentaire modérée et 3,6% une insécurité alimentaire grave (56). Par ailleurs, les insuffisances alimentaires qualitatives et quantitatives étaient également évaluées. Ainsi, 2,5% des ménages avec enfant interrogés ont déclaré ne pas avoir eu, souvent ou parfois, suffisamment à manger au cours des 12 derniers mois et 19,3% ne pas avoir tous les aliments qu'ils souhaitaient manger au cours des 12 derniers mois (56). Aussi, le nombre de personnes en France ayant eu recours à l'aide alimentaire a plus que doublé entre 2009 et 2017, passant de 2,6 millions en 2009 à 5,5 millions en 2017. L'aide alimentaire concerne de plus en plus de salariés, familles monoparentales ou encore des retraités (57). Face à des dépenses contraintes, l'alimentation devient pour ces ménages une variable d'ajustement (58).

L'insécurité alimentaire sur le long terme contribue à de nombreuses formes de malnutrition, altérant la santé physique et mentale des personnes (39). Certaines conséquences peuvent également menacer la santé des générations suivantes.

Des prévalences de malnutritions importantes

En 2018, le nombre de personnes en état de sous-alimentation avait augmenté pour sa troisième année consécutive, alors qu'il avait diminué entre 2005 et 2015. On comptait 821 millions de personnes sous-alimentées dans le monde en 2018, soit environ une personne sur neuf (50). De plus,

une personne sur trois souffre d'au moins une forme de malnutrition dans le monde. La malnutrition se définit comme un état pathologique dû à une déficience ou l'excès d'un ou plusieurs nutriments.

Les retards de croissance et l'émaciation (maigreur extrême) chez les plus jeunes touchaient en 2018 respectivement 155 millions et 52 millions d'enfants. Les carences en micronutriments sont également très répandues. Elles touchent plus de 2 milliards de personnes dans le monde (59). Les plus courantes sont les carences en fer, iode, folates (vitamine B9), vitamine A ou zinc. Toutes ces carences peuvent induire des problèmes de croissance, une diminution des capacités intellectuelles ou physiques, des complications périnatales et l'augmentation du risque de morbidité et de mortalité (59). En particulier, les anémies causées par une carence sévère en fer ou plus rarement en vitamines B12 ou B9 se caractérisent par un manque de globules rouges efficaces pour transporter l'oxygène aux tissus et aux organes. Elles réduisent ainsi les capacités physiques et intellectuelles et contribuent aux dysfonctionnements du système immunitaire des personnes touchées. Les carences en vitamine A seraient la première cause de cécité dans le monde et nuiraient aussi aux fonctions immunitaires (59). Les conséquences d'une carence en folates sont particulièrement graves pour les femmes enceintes, car elles induisent des anomalies de formation du tube neural de l'embryon. Très couramment, on observe une coexistence de plusieurs carences en micronutriments, amplifiant les problèmes de santé. Il est de plus en plus pressenti que certaines conséquences des carences en micronutriments peuvent persister dans les générations suivantes (59). Les régimes alimentaires peu diversifiés sont souvent en cause dans le développement de carences en micronutriments (60).

Le surpoids, autre marqueur de la malnutrition, est très répandu dans le monde puisque 1,9 milliard de personnes ont du surpoids dont 609 millions avec obésité en 2015 (61). La prévalence du surpoids aurait doublé entre les années 1980 et aujourd'hui (26) et toucherait en particulier les personnes âgées et les femmes, même si l'ensemble de la population mondiale est concerné. En France, les derniers résultats de l'étude Esteban estiment que 17% des Français ont une obésité, ce qui est une prévalence intermédiaire par rapport aux autres pays européens (62). La prévalence de l'obésité en France se stabilise dans le temps, mais reste à un niveau élevé (62).

L'Organisation mondiale de la Santé définit l'obésité comme un excès de masses adipeuses représentant un risque pour la santé. En épidémiologie, l'indice de masse corporelle (la masse en kilogramme sur le carré de la taille en mètre) est couramment utilisé pour définir un surpoids ou une obésité. Ainsi, le surpoids apparaît lorsque l'indice de masse corporelle d'une personne devient supérieur ou égal à 25 kg/m² et l'obésité lorsque l'indice devient supérieur ou égal à 30 kg/m². Cet indicateur est critiqué, car il ne permet pas de caractériser la dangerosité pour la santé du surpoids.

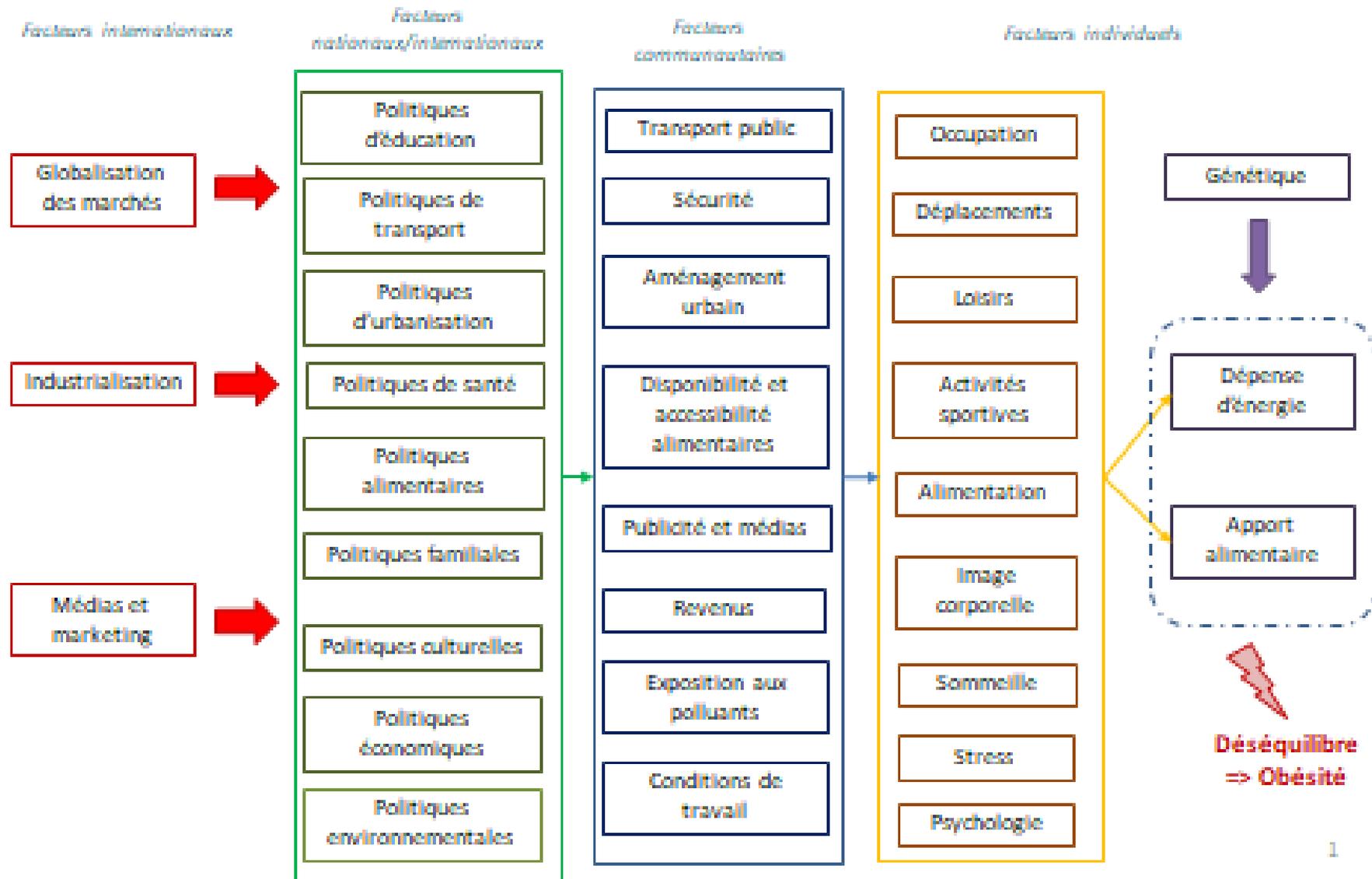


Figure 4: Toile causale de l'obésité (adaptation de Ritembaugh)

La dangerosité dépendrait plutôt de la localisation et la composition de l'excès (61). De plus, les seuils de surpoids et d'obésité ne seraient valables que pour les populations caucasiennes (61).

L'obésité est la conséquence de causes multifactorielles qui peuvent différer selon les personnes, c'est pourquoi on parle plutôt des obésités au pluriel. Afin de comprendre l'ensemble des éléments conduisant à l'obésité, des chercheurs ont proposé une toile causale Figure 4. Ainsi, l'obésité s'explique par un déséquilibre entre les apports et les besoins, mais de multiples facteurs individuels et environnementaux conduisent à ce déséquilibre.

Bien que d'autres déterminants soient en cause, la transition nutritionnelle, par les modifications de composition des régimes, contribue à l'augmentation de la prévalence de l'obésité (63). Des études plus récentes montrent aussi des associations entre l'exposition à certains résidus chimiques (pesticides, additives, par exemple) et le risque d'obésité (64).

Facteurs de risque des maladies chroniques

Les modifications de composition des régimes alimentaires seraient en cause dans la croissance de la prévalence des maladies chroniques, telles que les cancers, maladies cardiovasculaires ou diabète de type II. Aujourd'hui, les maladies chroniques sont reconnues comme étant le facteur principal de la charge mondiale de morbidité. D'après l'Organisation mondiale de la Santé, elles sont la cause d'environ 72% des décès au niveau mondial. Aussi, les années vécues avec une incapacité ont augmenté notamment en raison de l'allongement de l'espérance de vie et des fortes prévalences de maladies chroniques, représentant un coût important pour les sociétés. Le collectif d'experts scientifiques du GBD (Global Burden of diseases) a évalué cette perte d'année de vie en bonne santé (DALYs). Les résultats de leurs travaux (voir Figure 5) illustrent le rôle majeur des facteurs alimentaires, et d'anthropométrie dans le gain d'espérance de vie sans incapacité (65).

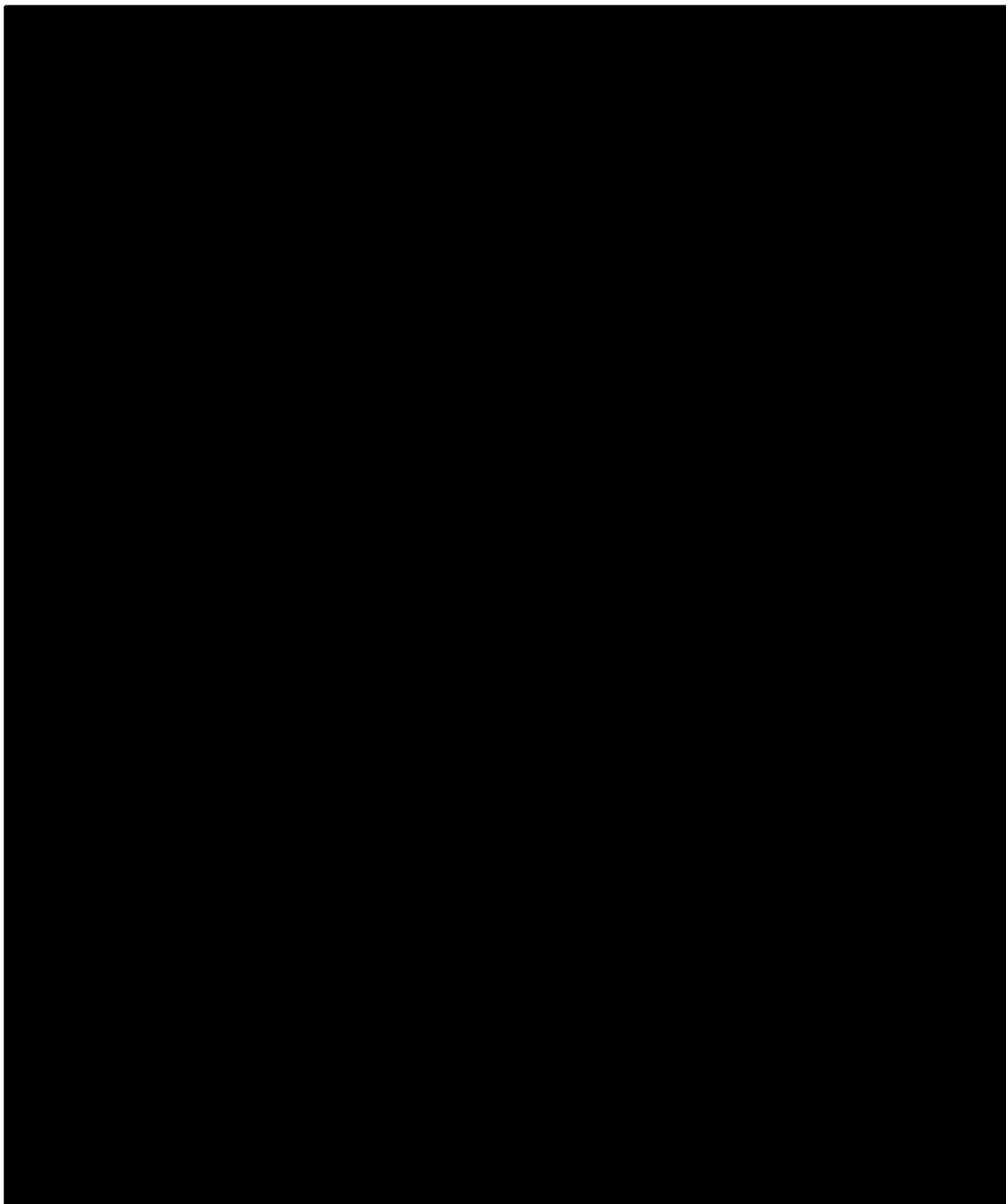


Figure 5: Parts attribuées aux principaux facteurs de risque au DALYs (Disability-adjusted life-years)
(source: GBD 2015)

Les travaux récents de la TEEBAgriFood, voire la Figure 6, ont permis de schématiser les liens entre les principaux facteurs des systèmes alimentaires et l'apparition de ces maladies.

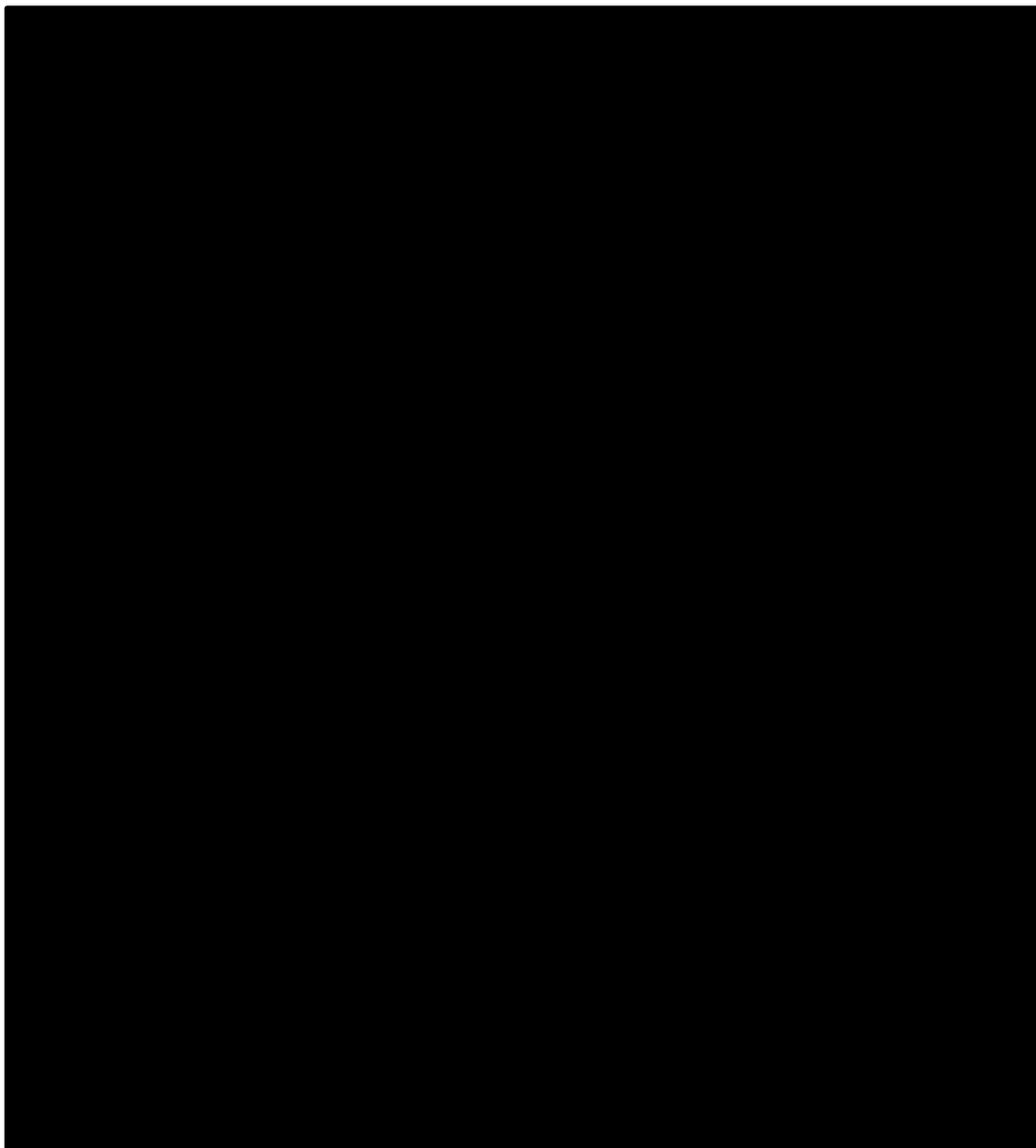


Figure 6: Systèmes alimentaires et santé (TEEBAgriFood, 2018)

On observe que ce sont à la fois les aliments, le régime alimentaire global et le statut nutritionnel qui déterminent la survenue des maladies telles que les diabètes de type II, les maladies cardiovasculaires, certains cancers et certaines maladies musculo-squelettiques. L'obésité est aussi un facteur de risque pour les diabètes de type II (66) , les maladies cardiovasculaires (66,67), certains cancers (68), les problèmes musculosquelettiques (69) ou les démences (70). Schulze *et al.* ont récemment résumé les connaissances sur les associations entre groupes alimentaires et la survenue des principales maladies chroniques (71). Globalement, les résultats montrent un rôle délétère de la viande rouge, de la charcuterie et des boissons sucrées, et un rôle protecteur des aliments complets, fruits et légumes, des produits laitiers fermentés et des boissons chaudes (thé, café et chocolat

chaud) sur la survenue de cancers et des maladies cardiovasculaires. De plus, les noix, le poisson et l'huile d'olive auraient un rôle protecteur vis-à-vis des maladies cardiovasculaires. Il faut néanmoins noter que certains groupes alimentaires ont été peu étudiés en comparaison à d'autres groupes. Des analyses sur ces groupes permettraient d'aboutir à des conclusions un peu plus exhaustives.

L'approche par régime alimentaire global montre que certains régimes par exemple de type DASH (Dietary Approaches to Stop Hypertension, régimes créés dans l'objectif de réduire la tension artérielle) ou méditerranéen sont protecteurs dans la survenue des maladies chroniques en comparaison avec les régimes courants (71).

L'exposition alimentaire ou professionnelle aux pesticides de synthèse pourrait aussi être associée au développement de certaines obésités (64) ou maladies chroniques (72–74). Des preuves scientifiques, en particulier en population générale, sont encore nécessaires, mais les hypothèses mécanistiques sont réalistes. Enfin, l'usage massif d'antibiotiques serait à l'origine d'une antibiorésistance remettant en question l'efficacité des traitements pour les animaux et les humains et menacerait la santé publique (3).

c/ Pour son partage insuffisant de la valeur économique et sa faible considération des aspects sociaux

Une valeur économique inégalement répartie entre acteurs des filières

Ces dernières décennies, les recherches agricoles et agronomiques se sont concentrées sur l'objectif visant à augmenter la productivité à l'hectare. Ces recherches ont conduit à l'industrialisation de l'agriculture, par l'usage d'outils de production technologiques (tracteurs, robot de traite,...) et d'intrants chimiques et pesticides de synthèse (2). L'intensification aurait permis en France de doubler la production en volume par rapport à 1960. Néanmoins, la valeur monétaire corrigée de l'inflation et hors subvention, de la production agricole totale aurait diminué de 16% (75).

Pourtant, malgré cette baisse de la valeur globale, certains acteurs de l'amont ou de l'aval sont parvenus à augmenter leurs marges brutes (76). Ils sont en effet très peu nombreux et représentent des parts de marché considérables. Pour illustration, 6 sociétés spécialisées dans l'agrochimie et les semences contrôlent à elles seules respectivement 75 % et 63 % des marchés mondiaux des pesticides et des semences. Cette concentration d'acteurs sur un marché provoque des situations de dépendance forte pour d'autres acteurs beaucoup plus nombreux.

Une étude française a montré que les agriculteurs captent en moyenne à peine 6% de la valeur totale de l'alimentation, bien qu'ils soient des acteurs majeurs (75). Cette faible capacité des producteurs à percevoir une juste part de la valeur de leur travail et leur forte dépendance aux acteurs de l'amont et de l'aval des filières a des conséquences néfastes sur leurs revenus et conditions de travail. En France en 2010, sur les grandes et moyennes exploitations, un quart des foyers avait un revenu agricole inférieur à 8000 euros par an et 10% avaient un revenu agricole négatif (77). De gros écarts étaient néanmoins visibles selon l'orientation des exploitations agricoles.

Dans certaines filières mondialisées comme celle du café, le phénomène est encore plus marqué. En effet, la situation économique d'une grande partie des caféiculteurs des filières conventionnelles n'est pas viable tant les revenus du café vert sont bas et fluctuants dans le temps (53,78). Les conditions de travail sont très difficiles (53,78) et le recours au travail des enfants persiste dans certaines régions (53). Parallèlement, seulement 3 multinationales (Nestlé (34%), JDE (30%) et Lavazza (17%)) réalisent 80% des ventes de café consommé à domicile (78). Leur pouvoir sur les marchés et la mise en place de stratégies de marketing, comme le développement des capsules ou dosettes, expliquent leur capacité à créer et capter la valeur des ventes du café (79).

Des coûts laissés à la charge des sociétés

Dans les parties précédentes, nous avons noté plusieurs impacts négatifs des systèmes alimentaires et en particulier des systèmes agro-industriels. Ces impacts n'apparaissent pas entièrement dans les modélisations macroéconomiques (par exemple le calcul du produit intérieur brut), ou microéconomiques (par exemple les comptes de résultat des exploitations agricoles), ils ont pourtant un coût monétaire, environnemental et humain.

La TEEBAgriFood propose un cadre afin de prendre en compte dans les bilans l'ensemble du système et donc l'intégralité des chaînes de valeur, stocks et flux économiquement invisibles (80). La valeur économique des services de l'agriculture conventionnelle et biologique a par exemple été comparée en utilisant ce cadre en Nouvelle-Zélande. L'étude montre que la valeur économique des services écosystémiques est bien plus élevée dans le système de culture biologique que dans le traditionnel (81). Parallèlement, la FAO a travaillé sur l'évaluation des coûts des impacts mondiaux de l'agriculture dans 40 pays représentant environ 80% de la production alimentaire mondiale (82). D'après cette étude, les impacts environnementaux de la production de céréales coûteraient environ 1150 milliards de dollars américains, soit plus de 170% de la valeur de production (82). Évaluer monétairement l'ensemble des coûts de la production alimentaire permet de prendre conscience que certains systèmes de culture ne sont pas rentables après prise en compte des coûts

environnementaux et sociaux invisibles dans les comptabilités classiques. Ces coûts sont souvent pris en charge par les sociétés ou laissés à la charge des prochaines générations.

Il faut néanmoins noter que de nombreuses questions méthodologiques dans l'évaluation monétaire d'une activité en prenant en compte les coûts cachés (ou externalités) persistent. Les impacts environnementaux sont de mieux en mieux considérés, mais les impacts sociétaux pourtant très nombreux sont encore trop souvent laissés de côté. De plus, les démarches consistant à affecter des prix à des éléments intangibles, comme la biodiversité, sont philosophiquement discutables. Elles conduiraient à vouloir compenser ou réintégrer les externalités dans le prix des produits, ce qui ne répond pas aux problématiques sociales ou environnementales induites par les impacts (83).

Marginalisation et fragilisation des systèmes alimentaires basés sur la paysannerie

Aujourd'hui, dans le monde, les petits producteurs en dehors des systèmes agro-industriels contribuent encore à nourrir la plupart de la population mondiale (3). Cette situation varie beaucoup en fonction des régions du monde (voir Figure 1). Néanmoins, au regard du développement des systèmes agro-industriels et de la situation dans les pays où ils sont bien implantés, les inquiétudes concernant la survie d'un mode de vie paysan peuvent facilement s'expliquer. Ainsi, en France on observe une massive disparition des fermes et des agriculteurs (84).

La tendance à l'urbanisation est également bien marquée puisque depuis 2007 et pour la première fois, le nombre d'urbains a dépassé celui des ruraux dans le monde (85). Cette importante urbanisation induit une demande alimentaire croissante dans les villes. Pour y répondre, la coordination des filières agricoles se verticalise (augmentation du nombre d'intermédiaires), ce qui exclurait les petits producteurs des marchés (86). Ajoutés à d'autres phénomènes, comme l'accaparement et la concentration des terres, les populations paysannes s'appauvrissent et se sentent parfois marginalisées (87). D'après la FAO, 80% des personnes connaissant la faim dans le monde vivent en zone rurale, beaucoup sont des agriculteurs ou des ouvriers sans terre. Face à cette pauvreté rurale, une réaction est alors de partir vivre en ville en espérant de meilleures conditions de vie, mais ceci accentue aussi l'urbanisation. Cet exode rural désagrège profondément le tissu social des campagnes alors que l'agrandissement des fermes et l'industrialisation modifient les paysages, un de nos héritages culturels.

Développement des alternatives, mais aussi des discriminations sociales par l'alimentation

Les nombreuses critiques des systèmes agro-industriels ont conduit au développement d'alternatives à ce système : l'agriculture biologique, le commerce équitable, les associations pour le maintien

d'une agriculture paysanne en sont des exemples. Aujourd'hui, ces alternatives restent souvent accessibles uniquement à une petite minorité, ce qui renforce certaines discriminations sociales par l'alimentation. Aux États-Unis, on parle de « *food desert* » pour désigner des quartiers souvent pauvres dans lesquels l'accès aux aliments de bonne qualité nutritionnelle à des prix abordables est limité (88). En France, la recherche des relations entre l'environnement alimentaire au sens géographique et les comportements alimentaires n'a pas été suffisamment étudiée, comparativement aux pays anglo-saxons qui ont développé une grande variété d'approches pour les mesurer (39). Ces problèmes d'accessibilité géographique sont peut-être moins forts en France qu'aux États-Unis, néanmoins, certains chiffres peuvent nous alarmer. Par exemple, des travaux sur les différences d'offres alimentaires de la ville de Lyon montrent des disparités entre arrondissements. Dans le 9^{ème} arrondissement, plutôt défavorisé, les chercheurs ont compté uniquement 2 épicerie biologique cohabitant avec 9 associations de distribution d'aliments et 4 grosses enseignes (89). Ces disparités mettent en évidence des inégalités d'accès géographique à des aliments préconisés dans les nouveaux repères de consommation alimentaire du Programme National Nutrition Santé.

Le rapport de l'INSERM sur les inégalités de santé en lien avec l'alimentation et l'activité physique nous rappelle également que derrière les différences de consommation entre milieux sociaux peuvent s'opérer des stratégies de distinction, notamment des classes dominantes, qui visent ainsi à maintenir leur singularité par rapport aux autres groupes sociaux (39). Les conséquences psychologiques de ces inégalités d'accessibilité alimentaire et aux stratégies de distinction par l'alimentation sont réelles. Des témoignages de personnes en situation de pauvreté font ressortir de nombreuses préoccupations et peurs en lien avec leur alimentation, ainsi qu'un sentiment de culpabilité du fait de ne pas être capable d'offrir une alimentation qu'ils jugent bonne à leur famille et notamment à leurs enfants. Ces situations contribuent à l'isolement des personnes perdant petit à petit l'aspect social de l'alimentation (90).

La question du changement d'échelle des alternatives pour les rendre accessibles à tous et ainsi éviter la coexistence de systèmes alimentaires à plusieurs vitesses est d'actualité. On remarque que pour certaines alternatives le changement d'échelle est en cours. Par exemple, les produits issus de l'agriculture biologique sont plus nombreux dans les grandes surfaces, mais cette généralisation se fait aussi avec le risque d'entorses aux principes fondateurs de l'alternative (91).

2) Le concept de durabilité appliqué au régime alimentaire

a/ Vers une alimentation durable

Les systèmes agro-industriels dans l'histoire de l'alimentation

Les systèmes alimentaires des pays occidentaux ont connu une brutale mutation au cours du 20^{ème} siècle. Les découvertes scientifiques du 19^{ème} et début du 20^{ème} siècle sont à l'origine de nouveaux outils comme les tracteurs, de nouvelles techniques comme la stérilisation à chaud ou des connaissances sur la fertilisation permettant à l'agriculture et l'alimentation de s'industrialiser et de pallier à certaines limites (2).

L'industrialisation de l'agriculture aurait ainsi commencé au début du 20^{ème} siècle et s'est accentuée à la fin de la seconde guerre mondiale en Europe de l'Ouest, notamment par la mise en place de plusieurs politiques comme le plan Marshall. L'intensification des méthodes de production par l'usage de ces techniques aurait permis de faire reculer la faim en Europe, tout en apportant et induisant des mutations immenses pour les paysans, les populations et les paysages. Les conséquences négatives de ces systèmes avaient déjà fait l'objet d'analyses et de revendication, voilà plus d'une soixantaine d'années. Les raisins de la colère de John Steinbeck, écrit en 1939, est un exemple d'œuvre témoignant et dénonçant les conséquences de l'industrialisation sur la nature et les hommes aux États-Unis.

Ces constats précoces n'ont pourtant pas empêché l'expansion des systèmes agro-industriels, dans d'autres parties du monde. Le phénomène porte le nom de révolution verte. Elle consiste en une politique de transformation des agricultures des pays moins industrialisés, entre les années 1960 et 1990, basée sur l'irrigation, la mécanisation, l'usage d'intrants et de variétés sélectionnées à haut rendement.

Les enjeux actuels pour l'environnement et les sociétés, décrits en première partie, sont donc des conséquences de choix politiques qui ont permis à plusieurs générations d'échapper à la faim, même si d'autres systèmes auraient peut-être pu faire de même. Ils furent des éléments déterminants dans la construction du concept de durabilité appliqué à l'alimentation.

La durabilité : une notion réactualisée

Le concept d'alimentation durable repose sur des réflexions assez anciennes autour d'une gestion durable ou soutenable de la nature. Ces questions sont aussi celles à l'origine du développement durable, devant concilier développement économique social et environnemental. Pour retracer

l'histoire du développement durable, on commence souvent par évoquer les travaux du club de Rome et la publication du rapport Les limites à la croissance de 1972. Ce rapport est présenté comme un point de départ d'un très large débat sur la coexistence entre développement et préservation de l'environnement qui a conduit au concept d'écodéveloppement (92). Il est reconnu dans ces travaux, que l'inégale répartition des ressources est à l'origine de problèmes de développement globaux. Les pays industrialisés connaissent un « mal développement » caractérisé par de nombreux gaspillages de ressources, alors que les pays les plus pauvres manquent de ces mêmes ressources, ce qui freine leur développement. L'écodéveloppement a été débattu lors de la conférence de Stockholm en 1972. Il a donné naissance à un autre concept plus consensuel de "développement durable" que l'on retrouve dans le rapport Brundtland, Notre avenir à tous, publié en 1987 par la Commission mondiale sur l'environnement et le développement.

Le rapport Brundtland établit que certains modes de développement dégradent l'environnement et que ces dégradations représentent un obstacle aux développements. Il avait ainsi comme objectif de définir les politiques nécessaires pour parvenir à un développement durable, défini pour la première fois officiellement comme : « *Un mode de développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre les capacités des générations futures à répondre aux leurs* ». Ainsi, l'objectif principal défini dans le rapport est une reprise de la croissance basée sur des activités et techniques plus respectueuses de l'environnement et des sociétés. Pour cela, les ressources naturelles doivent être utilisées de manière optimale pour permettre le développement, mais également pour des questions morales de préservation. Finalement, le rapport Brundtland dénonce le système. Il ne remet cependant pas en question la croissance et la nécessité des progrès techniques.

Par la suite, plusieurs conférences des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement, aussi connues sous le nom de Sommet de la Terre, se sont tenues afin d'initier des politiques globales de développement durable. Ces sommets ont aussi été des occasions de peaufiner les principes et priorités du développement durable. Le développement durable peut aussi être défini comme un développement visant à augmenter le bien-être humain en tenant compte des contraintes environnementales et des ressources, pour ne pas risquer une diminution de ce bien-être dans le futur. On retrouve dans le développement durable une préoccupation forte pour les questions d'inégalités et de justice.

Le développement durable est souvent schématisé par trois sphères caractérisant les aspects sociaux, environnementaux et économiques. La hiérarchie entre les sphères reflète deux visions de la durabilité (voir Figure 7). La durabilité forte pose que certains capitaux environnementaux doivent être conservés. Ces capitaux environnementaux ont donc une prééminence sur les autres. La durabilité faible considère au contraire que tous les capitaux sont substituables. Ainsi, il est possible d'impacter l'environnement, dans des limites raisonnables, si on en tire un gain social et/ou économique. La notion de développement durable faible est ainsi très consensuelle. Elle affirme en effet un objectif de conciliation entre objectifs écologiques et économiques, ce qui peut dans certains cas nuire à la protection de l'environnement. On reproche également à cette notion son flou notamment pour définir les limites soutenables d'usage d'un capital humain ou environnemental. Il existe en effet différentes manières de définir le soutenable ou durable qui s'opposent.



Figure 7: Différentes typologies de la durabilité (Boutaud 2014)

Une première façon de définir la durabilité repose sur les connaissances et traditions populaires. Ainsi, les populations avaient coutume de dire qu'un usage de la nature est durable s'il perdure dans le temps. Des archives montrent que déjà au 19^{ème} siècle, des groupes de populations se sont mobilisés contre un usage de certaines ressources jugé abusif et à leur sens non durable (93). Néanmoins, ces connaissances populaires ont rapidement été déstabilisées par d'autres visions basées sur les mathématiques et l'expertise. Il serait, selon ces autres points de vue, possible de prévoir l'évolution d'une ressource par son étude scientifique et l'expérimentation ponctuelle. On pourrait également se baser sur une gestion mathématique de la ressource, en rationalisant son usage pour permettre son renouvellement. Par exemple, la pêche industrielle s'est basée sur le concept de rendement maximum soutenable (MSY : Maximum Sustainable Yields). Il était donc autorisé de pêcher tant que le MSY n'était pas atteint. Néanmoins les hypothèses d'une nature prévisible et linéaire à l'origine du calcul du MSY se sont révélées fausses et son usage a conduit, sous couvert de durabilité, à l'épuisement des réserves de nombreuses espèces de poissons (93).

Ainsi, les pratiques et réflexions autour de la durabilité sont bien plus anciennes que le rapport de Brundtland. Le développement durable reste plutôt consensuel, car il donne la liberté à une grande possibilité d'interprétations. Néanmoins, certains voient une opposition radicale entre le terme de développement et de durable, semblable à celui de « guerre propre » (92). Aussi, certains reprochent de vouloir transmettre par ce terme une vision occidendo-centrée du développement.

b/ Application de la durabilité à l'alimentation

Définir comment garantir la sécurité alimentaire

La notion de sécurité alimentaire a été largement utilisée au cours du 20^{ème} siècle. Elle est d'ailleurs encore d'actualité dans de nombreuses instances de l'Organisation des Nations Unies et programmes de recherche. Néanmoins, son usage serait aujourd'hui marqué par la lutte contre la sous-nutrition dans les pays peu industrialisés (94,95). Il est donc parfois reproché à la sécurité alimentaire de servir la cause du productivisme (94,95), l'argument étant que pour garantir la sécurité alimentaire pour tous, il faudrait augmenter la quantité d'aliments produits et donc intensifier encore plus l'agriculture, sans se soucier des conséquences notamment sur l'environnement. Pourtant dans son écriture, la définition de la sécurité alimentaire intègre déjà des perspectives sociales et écologiques.

Le reproche porte donc plus sur la manière dont la notion est utilisée et sur ce qui est mis en avant. En effet, la sécurité alimentaire définit un objectif à atteindre, mais ne tranche pas sur les moyens d'y parvenir. Néanmoins, pour certains auteurs comme Tim Lang et David Bardeling, le seul moyen pour

que les systèmes alimentaires soient en capacité d'assurer la sécurité alimentaire serait qu'ils soient durables (94). D'ailleurs, la première définition d'une alimentation durable de la FAO est « une alimentation avec un faible impact sur l'environnement contribuant à la sécurité alimentaire et nutritionnelle pour une vie en bonne santé des générations actuelles et futures ».

Définition des régimes alimentaires et durables de la FAO

L'alimentation durable aurait pour origine la rencontre de deux grands courants d'appréhension de la durabilité de l'alimentation (76). Le premier courant a une entrée plutôt socioéconomique de réaction au développement des systèmes alimentaires agro-industriels. Ce courant souligne en particulier les problématiques de santé, de goût, de modifications des comportements alimentaires et à une échelle plus globale, les problématiques d'accès et de gouvernance de l'alimentation. Alors que le second courant part d'une analyse des impacts environnementaux des systèmes alimentaires agro-industriels ou de cycle de vie des filières alimentaires. Néanmoins, ces deux courants partagent une volonté de changer (ou de voir disparaître pour les plus radicaux) les processus industriels de l'alimentation et le cadre conceptuel des systèmes alimentaires (76). La durabilité de l'alimentation aurait été définie en combinant ces deux courants.

La première mention du terme d'alimentation durable daterait des années 80, elle propose de faire le lien entre la santé des populations et celle de la planète (96). Néanmoins, c'est en 2010 que la FAO a proposé sa définition stabilisée de régime alimentaire durable qui sera largement utilisée par la suite. Ainsi, selon la FAO, « *Les régimes alimentaires durables contribuent à protéger et à respecter la biodiversité et les écosystèmes, sont culturellement acceptables, économiquement équitables et accessibles, abordables, nutritionnellement sûrs et sains, et permettent d'optimiser les ressources naturelles et humaines* » (96).

Cette définition inscrit les problématiques du régime alimentaire individuel dans ceux plus généraux des systèmes alimentaires. On remarque également la grande complexité de la définition qui contient des éléments flous et sujets à plusieurs interprétations comme l'expression « culturellement acceptable ». Les différents éléments de la définition peuvent également se retrouver en conflit. Le respect de la biodiversité peut par exemple s'opposer à l'accessibilité. Ces tensions imposent un besoin de hiérarchisation ou de consensus entre éléments. Selon les acteurs s'appropriant la définition, cette hiérarchisation peut être différente.

Aujourd'hui, la notion d'alimentation durable est très utilisée. Plusieurs pays l'incluent dans leurs politiques agricoles ou alimentaires. Par exemple, en ce qui concerne la nutrition, des états veillent

maintenant à considérer la durabilité de l'alimentation dans la rédaction des repères alimentaires (97).

Une notion critiquée et incomplète ?

Aujourd'hui, il existe un grand nombre de termes utilisés partageant des constats ou objectifs proches de ceux de l'alimentation durable. Leur utilisation permet d'accentuer un aspect moins présent ou d'apporter de nouveaux éléments pour orienter les débats. Un exemple est celui de la souveraineté alimentaire proposée par le mouvement international paysan La Via Campesina. La mise en place de la souveraineté alimentaire³ permettrait aux populations de définir leurs propres systèmes agricoles et alimentaires. L'évolution du terme de souveraineté alimentaire met maintenant l'accent sur le besoin d'une gouvernance alimentaire démocratique (98). La question de la gouvernance n'est en effet pas explicite dans la définition d'alimentation durable de la FAO malgré le fait que certains la devinent au travers du culturellement acceptable. Théoriquement, en laissant le peuple souverain de son alimentation, les systèmes agro-industriels qui profitent à une minorité seraient amenés à disparaître, alors que d'autres, respectueux des écosystèmes et des humains, pourraient les remplacer.

Parallèlement, d'autres acteurs choisissent de combiner les termes afin de compléter celui d'alimentation durable. On peut donner l'exemple du projet européen SUSFANS (99) dont l'objectif est de fournir des outils afin de garantir une alimentation durable et la sécurité nutritionnelle (SFNS : Sustainable food and nutrition security). Dans un autre registre, le mouvement ATD-Quart monde spécialiste des questions de précarité vient de publier une charte pour une alimentation digne et durable. Ici, les militants souhaitent mettre en avant la nécessité de garantir un accès à une alimentation durable pour tous, c'est-à-dire défendre un droit à l'alimentation et pas uniquement un droit à être nourris. Le droit à l'alimentation est selon Jean Ziegler un droit à un accès régulier, permanent et libre, soit directement soit au moyen d'achat monétaire, à une nourriture quantitativement et qualitativement adéquate et suffisante, correspondant aux traditions culturelles du peuple dont est issu le consommateur, en assurant une vie psychique et physique, individuelle et collective, libre d'angoisse, satisfaisante et digne (100). L'ajout de la notion de dignité dans le titre de la charte permet ainsi de rendre visibles les discriminations en termes d'alimentation, que vivent les personnes en situation de pauvreté, en particulier celles qui consistent à ne pas pouvoir choisir son alimentation (58).

³ Aujourd'hui, la souveraineté alimentaire est définie comme un droit international qui laisse la possibilité aux populations, aux États ou aux groupes d'États de mettre en place les politiques agricoles les mieux adaptées à leurs populations sans qu'elles puissent avoir un effet négatif sur les populations d'autres pays.

Ainsi comme beaucoup d'autres termes celui d'alimentation durable connaît de nombreuses interprétations. Il peut paraître, pour certains acteurs, incomplet ou ne mettant pas suffisamment l'accent sur certaines problématiques. Néanmoins, on peut lui reconnaître le mérite d'avoir apporté des éléments sur les moyens de garantir la sécurité alimentaire en mettant l'accent sur le besoin de prendre en compte l'environnement, le social et la culture.

c/ Un développement d'alternatives entrant dans le débat sur l'alimentation durable

En réaction à certains constats de non-durabilité du système alimentaire agro-industriel, des acteurs ont proposé des approches différentes de produire, de distribuer ou de consommer. Certaines de ces alternatives font partie des débats, car elles pourraient participer à rendre les systèmes alimentaires plus durables. Dans cette dernière partie, nous reviendrons sur les objectifs et fondements de quelques alternatives afin de cadrer les propos qui suivront. Nous évoquerons brièvement l'agriculture biologique, les circuits courts, le commerce équitable et les différents niveaux de fléxitarisme.

L'agriculture biologique

En Europe, plusieurs courants sont à l'origine de l'agriculture biologique. On peut citer parmi les pionniers l'autrichien Rudolph Steiner, père de la biodynamie (mouvement qui repose sur l'agronomie, mais également sur l'analyse des cycles lunaires), l'anglais Albert Howard et le suisse Hans Muller, fondateur du mouvement organo-biologique (101). C'est dans les années 1950 que l'agriculture biologique émerge en France. On peut distinguer deux mouvements, l'un plus technique basé sur la méthode dite Lemaire-Boucher et l'autre avec un projet plus global de société qui donnera naissance à l'association Nature et Progrès (101). Depuis, l'agriculture biologique connaît une forte croissance.

Aujourd'hui, le règlement CE n°834/2007 définit le mode de production biologique ainsi : « *La production biologique est un système global de gestion agricole et de production alimentaire qui allie les meilleures pratiques environnementales, un haut degré de biodiversité, la préservation des ressources naturelles, l'application de normes élevées en matière de bien-être animal et une méthode de production respectant la préférence de certains consommateurs à l'égard des produits obtenus grâce à des substances et des procédés naturels.* »

La réglementation exige pour la transformation que 95% des matières premières soient issues de l'agriculture biologique. Les additifs de synthèse sont interdits et les additifs auxiliaires technologiques et arômes, ne peuvent être utilisés que s'ils sont mentionnés dans la liste de produits

autorisés. Pour les produits contenant moins de 95% d'ingrédients bio, les ingrédients biologiques peuvent être précisés dans la liste des ingrédients. La mixité est possible sous certaines conditions. Les organismes génétiquement modifiés sont interdits, mais le seuil de présence fortuite de 0,9% est autorisé.

Les circuits courts de distribution

Le ministère de l'Agriculture et de la Pêche a officialisé la définition des circuits courts pour la France. Ainsi, « *Un circuit court est un mode de commercialisation des produits agricoles qui s'exerce soit par la vente directe du producteur au consommateur, soit par la vente indirecte à condition qu'il n'y ait qu'un seul intermédiaire* ». Cette définition permet donc une grande pluralité de canaux de vente en circuits courts (de l'e-commerce à la vente à la ferme), de produits (plus ou moins transformés) ainsi que de distances entre les producteurs et les consommateurs.

Ces dernières années se développe un grand nombre de nouvelles formes de circuits courts un peu partout dans le monde. Ces nouvelles formes d'approvisionnements sont construites dans l'objectif d'établir des relations plus directes entre la production agricole et les consommateurs. Elles partent donc de critiques du système dominant de distribution. Certaines critiques concernent la faible rémunération des producteurs, les règles excluant certains produits et donc certains producteurs. De plus, il est constaté que les prix et produits dans les rayons ne permettent pas à tous d'accéder à des aliments jugés de meilleure qualité. Un renforcement de liens sociaux ou de solidarité entre producteurs et consommateurs peut alors également être recherché.

Le commerce équitable

Le commerce équitable vise à garantir une rémunération juste à l'ensemble des acteurs de la production et ainsi réduire les inégalités sociales et environnementales engendrées par le commerce conventionnel. En France, la loi n° 2014-856 du 31 juillet 2014, sur l'Economie Sociale et Solidaire précise la définition du commerce équitable comme un commerce qui doit garantir :

- Des prix rémunérateurs pour les producteurs, basés sur les coûts de production et une négociation équilibrée.
- Un engagement commercial pluriannuel entre les producteurs et les acheteurs.
- Le versement d'un montant supplémentaire destiné au financement de projets collectifs.
- Une autonomie des producteurs grâce à la mise en place d'une gouvernance démocratique dans leurs organisations.
- La transparence et la traçabilité des filières.

- La sensibilisation des consommateurs à des modes de production socialement et écologiquement durables

Par cette loi, la définition du commerce équitable s'étend à des relations avec tous. Elle était auparavant réservée aux producteurs des pays en développement.

Les objectifs du commerce équitable sont donc d'œuvrer pour un rééquilibrage du pouvoir entre acteurs des filières et un partage plus juste de la valeur économique.

Le végétarisme

On peut définir simplement le végétarisme comme un mode alimentaire qui exclut les aliments d'origine animale. En fonction du degré d'exclusion et des produits animaux restreints, il est possible de distinguer plusieurs régimes alimentaires, présentés à la suite (102) :

- Flexitarien : régime de type végétarien ou végétalien, mais avec une consommation des aliments exclus lors d'occasions particulières.
- Semi-végétarien : exclut uniquement la viande rouge.
- Pesco-végétarien : exclut la viande, mais tolère la consommation de poissons et fruits de mer.
- Ovo-lacto-végétarien : exclut la viande et inclut tout autres aliments d'origine animale, tels que le miel, les œufs, le poisson ainsi que les produits lactés. Le régime lacto-végétarien est un régime végétarien qui inclut les aliments à base de lait alors que le régime ovo-végétarien est un autre type de régime végétarien qui inclut les œufs.
- Végétalien : exclut la totalité des produits provenant de l'exploitation animale et leurs dérivés comme le miel.

Le végétalisme peut s'étendre à un mode de vie appelé véganisme, caractérisé par l'absence de produits animaux dans la vie quotidienne (cosmétiques, vêtements, matériaux, etc.).

Globalement, les motivations pour adopter ces régimes sont liées à la santé et à l'éthique. Elles peuvent également être renforcées par des motivations environnementales. La hiérarchisation entre les motivations dépend des personnes, elle influe aussi la composition du régime (102).

3) État de l'art sur l'étude de la durabilité des régimes alimentaires

a/ Comment nourrir une population mondiale croissante durablement ?

Les scénarios globaux à l'échelle mondiale

De nombreux scénarios ont eu pour objectif de documenter la question sur la possibilité de nourrir durablement le monde et les moyens de le faire, sachant qu'il est prévu que la population humaine continue de croître dans les prochaines années pour atteindre 11,2 milliards d'individus en 2100, selon les prévisions et statistiques démographiques des Nations Unies. En 2017, une révision de la littérature des scénarios répondant à cette question a été réalisée avec un intérêt particulier pour la question des sols et de leurs changements d'affectation (103).

Les résultats de ce travail bibliographique montrent que pour la construction des scénarios, l'estimation de la croissance de la population mondiale est assez consensuelle alors que celles du PIB et de la croissance économique sont moins homogènes. La plupart des études s'accordent sur un besoin de produire en moyenne environ 3000 kcal/j et par personne en 2050 et une consommation globale de viande qui devrait augmenter. Ainsi, sans alternative au système de production et de consommation actuel, les besoins en produits agricoles devraient augmenter entre 50 et 69% selon les scénarios (103).

Pour y parvenir, les auteurs de ces scénarios proposent plusieurs leviers d'actions : manger moins, manger moins de viande et réduire les gaspillages, produire moins d'agrocarburants, et augmenter les rendements. Il est également proposé d'étendre les terres cultivables, mais cette solution ne fait pas consensus en raison de la déforestation induite. Il est également proposé de travailler sur les méthodes de culture. Enfin, les systèmes d'élevage pourraient certainement être plus performants, mais, en 2017, ce point était peu étudié (103).

Récemment, l'équipe de recherche de Springmann a réalisé des scénarios afin de mesurer l'effet de différents leviers sur les émissions de gaz à effet de serre, l'occupation des terres, les besoins en eau bleue en nitrogène et en phosphore (104). Ils montrent ainsi que les modifications dans la composition des régimes sont le levier le plus important pour réduire les émissions de gaz à effet de serre des régimes alimentaires. L'amélioration des pratiques agricoles permettrait quant à elles de réduire majoritairement les autres impacts évalués lors de cette étude. Néanmoins, la combinaison des leviers d'amélioration des pratiques agricoles, de réduction des pertes et de changement de

régime alimentaire avec un objectif modéré permettrait de réduire les impacts environnementaux autour de 25 à 45% par rapport à la situation projetée pour 2050 à partir des tendances (104).

À côté de ces scénarios, le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation de France a proposé un scénario tendanciel, Mond'alim2030 (3). L'objectif de ce scénario différait des précédents, car il consiste à décrire un futur très probable pour les systèmes alimentaires mondiaux construits à partir des tendances actuelles. Nous présenterons quelques conclusions de ce travail comme éléments d'interprétation et de prise de recul sur les résultats présentés par la suite. Ainsi, d'après les auteurs du panorama Mond'alim 2030, dans le futur proche, les interconnexions entre systèmes alimentaires se renforceront en particulier par la mondialisation, l'urbanisation, l'augmentation de la proportion de la population dans la classe moyenne et la consolidation d'un droit sanitaire international. Néanmoins, la mondialisation économique des systèmes alimentaires devrait être moins importante que d'autres secteurs économiques mondialisés. L'alimentation restera certainement un marqueur fort de l'identité et de la culture de chaque zone géographique. Aussi, de nouveaux acteurs (pays, acteurs privés, organisations de la société civile...) proposant d'autres orientations devraient s'affirmer. Ce scénario fait néanmoins l'objet de grandes incertitudes face à de nombreux signes de contestation de la mondialisation et l'hypothèse probable d'une crise majeure.

Le scénario Afterres2050 à l'échelle de la France

En France, l'association Solagro a effectué un travail prospectif, nommé Afterres2050, dont l'objectif est de proposer une transition possible pour les systèmes alimentaires français afin d'atteindre un futur souhaité (105). Le scénario Afterres2050 propose deux variantes : une mettant l'accent sur la qualité nutritionnelle des aliments, les aspects sanitaires et environnementaux alors que l'autre variante est plus productive, car l'accent a été mis sur la sécurité alimentaire. Ce scénario s'appuie sur un outil de modélisation mis en place par l'association MoSUT mettant en correspondance les productions et outils de production avec les besoins en aliments et matières premières. Les principaux leviers pour les systèmes alimentaires identifiés par ce travail sont (105) :

- Un rééquilibrage de notre alimentation,
- La généralisation d'une agriculture multifonctionnelle de type agriculture biologique ou intégrée,
- Un maintien des flux importations/exportations,
- L'extensification des systèmes d'élevage et donc une réduction massive des importations de protéines destinées à l'alimentation animale,
- La réduction des gaspillages,

- La réduction et la stabilisation du rythme d'artificialisation des sols.

Le levier de l'agriculture biologique

Ces dernières années, plusieurs auteurs se sont questionnés sur les capacités de l'agriculture biologique à nourrir les populations convenablement tout en répondant aux enjeux environnementaux et sociétaux actuels. En 2016, Reganold a publié une revue de la littérature sur les performances de l'agriculture biologique, divisées en quatre groupes : la productivité, les impacts environnementaux, la viabilité économique et le bien-être social (106). Ainsi, il conclut que malgré des rendements en moyenne plus faibles, l'agriculture biologique a moins d'impact sur l'environnement, apporte des bénéfices sociaux et pour les écosystèmes (106).

Plus récemment, Muller a réalisé des modélisations afin d'étudier le rôle que pourraient jouer les systèmes alimentaires biologiques dans la réalisation d'une alimentation durable (107). Son travail montre que le passage vers une agriculture biologique est favorable pour un grand nombre d'indicateurs environnementaux (la biodiversité n'est pas considérée dans cette étude). Néanmoins, elle entraîne une augmentation de l'utilisation des terres, et plus de déforestation. Aussi, les résultats sur l'atténuation des changements climatiques sont mitigés. En effet, l'agriculture biologique permet de diminuer les émissions de gaz à effet de serre par l'usage moindre de fertilisants de synthèse. Néanmoins, les rendements plus faibles en agriculture biologique induiraient un besoin de terre plus important à l'origine de plus d'émissions de gaz à effet de serre liées à la déforestation. La conversion vers l'agriculture biologique pourrait déséquilibrer le cycle de l'azote. Des mesures pour pallier ce problème sont nécessaires, comme l'augmentation des cultures de légumineuses ou la généralisation de l'usage des déchets organiques. En essayant d'autres scénarios avec une réduction du nombre d'animaux d'élevage et une diminution des gaspillages, Muller conclut que l'agriculture biologique est capable de fournir suffisamment de denrées alimentaires d'ici à 2050 tout en réduisant les pressions environnementales, à condition que les conversions soient bien pensées, c'est-à-dire réfléchies pour répondre au challenge de l'augmentation de l'occupation des sols d'une part ainsi que de celui de l'azote pour maintenir une fertilité des sols suffisante d'autre part (107).

Parallèlement, Eyhorn propose un processus influencé par l'agriculture biologique permettant à l'ensemble du système alimentaire d'être plus durable (108) en :

- (i) soutenant spécifiquement la conversion des systèmes de production vers des systèmes plus durables par une combinaison de mesures incitatives et habilitantes, en cherchant à améliorer leur performance
- (ii) stimulant la demande pour des produits durables
- (iii) incitant l'ensemble des systèmes agricoles et alimentaires à mettre en place des actions pour améliorer la durabilité de leurs pratiques
- (iv) relevant les exigences légales et les normes afin d'éliminer les pratiques particulièrement non durables.

Score d'évaluation de la durabilité des systèmes alimentaires globaux

Finalement, afin de mesurer la durabilité des systèmes alimentaires et les actions mises en place, l'usage d'indicateurs ou de scores peut être pertinent. À notre connaissance, il existe uniquement une seule proposition de score pour mesurer la durabilité des systèmes alimentaires, nommée le SNS (Sustainable Nutrition Security) (109). Ce score comporte les sept sous-scores suivants : l'adéquation nutritionnelle, la préservation des écosystèmes, une alimentation accessible et abordable, le bien-être socio-culturel, la sûreté des aliments, la résilience et la diminution des déchets et des pertes.



Figure 8: Indicateurs par sous-score du SNS (Gustafson, 2016)

Chacun de ces sous-scores comporte plusieurs indicateurs, présents dans la Figure 8 (sur une échelle de 0 à 100).

Le SNS peut ainsi être utilisé pour mesurer et comparer les systèmes alimentaires d'un point de vue plus holistique, ce qui est nécessaire pour éviter le transfert de problèmes. Un exemple donné dans l'article est qu'on ne peut continuer de recommander aux populations de manger plus de fruits et légumes pour des raisons nutritionnelles sans que d'autres politiques prennent en compte les problèmes d'accès à l'eau ou les conditions déplorables de travail de certains travailleurs agricoles (109).

b/ Les leviers à l'échelle des régimes alimentaires

Modifier la structure de son régime alimentaire

Les résultats de la modélisation

Les techniques d'optimisation mathématique sont utilisées depuis plusieurs décennies dans le domaine de la nutrition pour répondre à différentes questions de recherche. L'optimisation appliquée aux régimes alimentaires est une technique permettant en effet de concevoir des solutions qui respectent un ensemble de contraintes tout en optimisant une ou plusieurs fonctions objectives. Cette méthode est largement utilisée aujourd'hui pour identifier les meilleurs compromis entre les dimensions de l'alimentation durable. L'utilisation de l'optimisation est intéressante, car elle permet de réduire les aspects arbitraires ou subjectifs d'autres méthodes telles que les processus de substitutions. Néanmoins, les solutions obtenues sont dépendantes des contraintes et des fonctions objectives choisies.

Plusieurs revues de la littérature portant sur cette méthode appliquée aux régimes alimentaires durables ont été publiées récemment (110,111). L'introduction de la durabilité dans les problèmes d'optimisation a été initiée par la recherche de régimes de bonne qualité nutritionnelle ayant un prix minimal. Les résultats montrent qu'en imposant une diminution du prix, la qualité nutritionnelle du régime se détériore. Les régimes sont plus denses en énergie et plus riches en lipides (110,111). D'autres travaux ont eu pour objectif de déterminer un prix théorique minimum pour un régime répondant aux besoins nutritionnels. En France, le prix moyen pour des solutions de régimes alimentaires, proches des habitudes, est autour des 3,50€/j (110). Des prix plus bas sont atteignables, mais il est alors nécessaire de changer fortement les habitudes alimentaires des populations, ce qui peut probablement réduire leur acceptabilité. Ainsi, l'ensemble de ces études confirme l'existence de tensions entre les composantes nutritionnelles, de respect des habitudes et de prix bas. On note

néanmoins que les estimations de prix des régimes étaient souvent effectuées sur des prix moyens sans considérer les régions d'habitation, les lieux d'approvisionnements, les capacités d'autoproduction et les modes de production. La prise en compte de ces paramètres pourrait certainement modifier les résultats obtenus.

L'introduction des critères environnementaux dans l'optimisation est plus récente. Macdiarmid *et al.* sont une des premières équipes à avoir considéré les émissions de gaz à effet de serre dans les paramètres de modèles de programmation linéaire afin d'obtenir des solutions de régimes moins émetteurs. Elles trouvent une première solution permettant la réduction des émissions de gaz à effet de serre liées à la production des régimes de 90%, mais comprenant uniquement 7 aliments (sur 82 disponibles) (112). Ce régime a été jugé inacceptable culturellement, car les déviations par rapport aux habitudes alimentaires sont trop importantes. D'autres solutions ont alors été proposées en ajoutant des contraintes d'acceptabilités dans les paramètres d'optimisation, c'est-à-dire en imposant des solutions plus proches des régimes observés. Une solution de régime avec un prix comparable aux régimes observés, permettant de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 36%, répondant aux contraintes nutritionnelles et contenant 52 items a été trouvée (112). Depuis, d'autres travaux d'optimisation ont été réalisés en considérant ces critères et en introduisant plus d'items. Le WWF (World Wide Fund) a par exemple réalisé des assiettes « bas carbone » grâce à cette méthode, d'abord au Royaume-Uni puis en Espagne, en France et en Suisse. Les régimes ainsi obtenus sont tous moins riches en viande et en particulier en viande de ruminants (bœuf et mouton). Les produits laitiers peuvent aussi être diminués tout comme les produits gras et sucrés. Au contraire, on observe une augmentation des fruits et légumes, des légumineuses et des produits à base de céréales complètes dans les régimes optimisés sous contraintes par rapport aux régimes observés. Dans les assiettes du WWF, la consommation de poissons est également augmentée, car aucune contrainte sur la biodiversité ou l'exposition aux contaminants n'a été introduite. Finalement, les derniers travaux semblent s'accorder sur la possibilité de diminuer les émissions de gaz à effet de serre d'environ 30% sans modification majeure de la structure du régime et avec des impacts mineurs sur la qualité nutritionnelle et le prix (110). Au contraire, une réduction de plus de 30% des émissions de gaz à effet de serre aurait tendance à induire une diminution du prix, mais demande d'importantes modifications dans la structure du régime. Ainsi, les paramètres de prix et d'émissions de gaz à effet de serre seraient faciles à concilier, mais sont plus souvent en conflit avec les paramètres liés à la nutrition et les questions d'acceptabilités (110). Il est aussi important de maîtriser l'apport énergétique des régimes dans la structuration des problèmes d'optimisation, car une diminution de l'apport énergétique peut induire trivialement des diminutions de gaz à effet de serre et de prix.

De nombreuses études s'appuient sur les émissions de gaz à effet de serre comme seul indicateur des impacts sur l'environnement. Kramer, à partir de données hollandaises a cherché à minimiser les écarts de consommation par rapport à la consommation observée en satisfaisant les contraintes nutritionnelles et en diminuant progressivement les impacts environnementaux, représentés par un score pondéré de trois indicateurs environnementaux (113). Ce score nommé le pReCiPe se mesure avec les données sur les émissions de gaz à effet de serre, l'utilisation des sols et l'énergie nécessaire à la production des régimes. La Figure 9 montre les modifications par groupe d'aliments obtenues en réduisant le pReCiPe. On observe, par rapport à un régime sans contrainte environnementale, une diminution des consommations de viande et des boissons, alors que les consommations de légumes, de fruits et de produits laitiers restent stables et celles de pains, de poissons gras et de légumineuses augmentent (113). L'intensité des modifications dépend du sexe et de l'âge, les régimes de départ et les contraintes étant différents. Sur la Figure 9, le point critique est indiqué, c'est-à-dire le point pour lequel les modifications de régime deviendront compliquées à mettre en place. Il intervient pour une réduction des impacts entre 21 et 30%, selon les groupes (113).

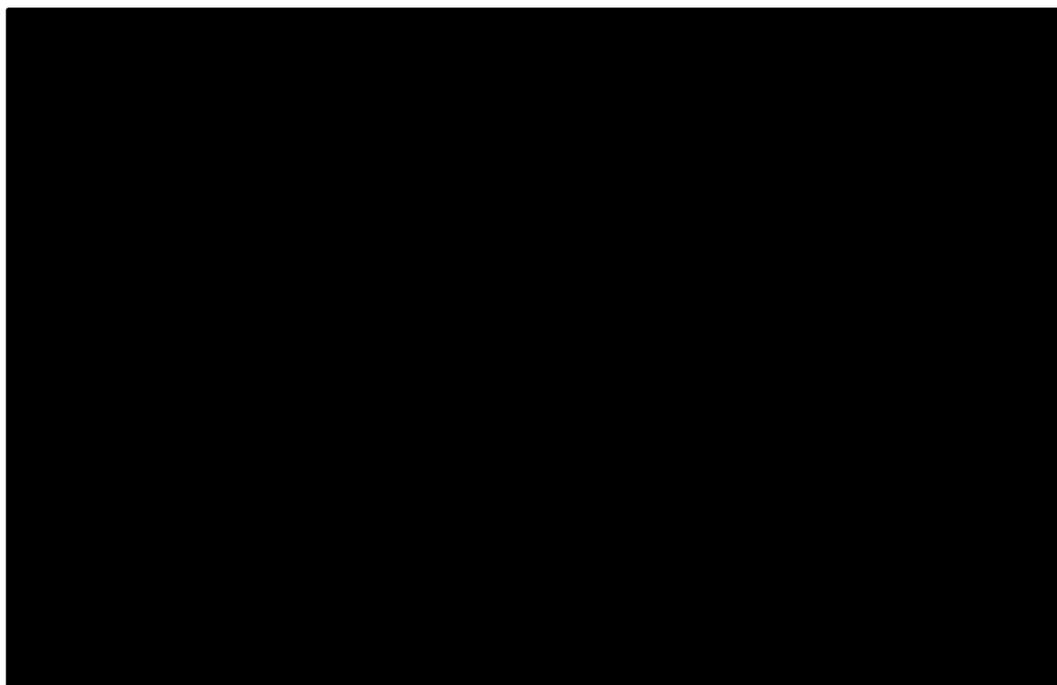


Figure 9: Quantités des différents groupes alimentaires en fonction de la diminution des impacts environnementaux (pReCiPe) imposée dans l'optimisation et courbe de pénalité pour les hommes hollandais de 31 à 50 ans (Kramer, 2017)

Donati a également proposé d'autres indicateurs environnementaux (les émissions de gaz à effet de serre, la consommation d'eau et l'usage des terres) et une méthodologie différente pour identifier des régimes plus durables. L'étude se base sur les données de consommation de 104 étudiants de la ville de Parme en Italie et une base de 544 aliments ou boissons (114). La solution de régime optimisé devait présenter à la fois un prix inférieur à un prix déterminé et les indicateurs

environnementaux ne devaient pas dépasser une valeur obtenue lors d'optimisations précédentes de ce travail (approche hiérarchique⁴). Méthodologiquement, cette étude est intéressante, car en plus d'introduire les résultats de précédentes optimisations dans les contraintes, elle propose des contraintes pour que les habitudes de consommation combinées (céréales du petit déjeuner avec un produit laitier par exemple) soient prises en compte.

Enfin, en plus de couvrir les besoins nutritionnels dans un objectif de promotion de la santé et de réduction des maladies, plusieurs travaux ont cherché à limiter les risques vis-à-vis des contaminants apportés par l'alimentation. Parmi ces travaux, nous pouvons citer le travail d'optimisation réalisé par Darmon *et al.* . Il consistait à tester si les changements alimentaires requis pour atteindre les besoins nutritionnels étaient compatibles avec une exposition acceptable aux contaminants les plus courants (des pesticides, mycotoxines, métaux lourds, polychlorobiphényles non dioxine et les composés de type dioxine) (115). Les résultats de cette étude montrent que dans un modèle avec uniquement des contraintes nutritionnelles, les changements proposés sont associés à des augmentations significatives des expositions pour certains contaminants. Néanmoins, il est montré qu'il est également possible de parvenir à atteindre les besoins nutritionnels sans dépasser les niveaux d'exposition aux contaminants observés, mais par des écarts de consommation plus grands (115). Aussi, l'ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) dans le processus d'élaboration des nouvelles recommandations nutritionnelles a introduit des contraintes relatives à l'exposition à certains contaminants (116) afin que le régime optimisé ne dépasse pas les valeurs toxicologiques de référence pour 98 substances. Les résultats témoignent de difficultés pour identifier des solutions permettant de couvrir les besoins nutritionnels de la quasi-totalité de la population sans accroître le risque lié à l'exposition aux contaminants, tout en restant dans une gamme d'apports alimentaires observés (116). Les résultats ont montré que pour certains groupes d'aliments comme les produits laitiers ou les jus de fruits, les solutions sont différentes en ajoutant le paramètre de l'exposition à des contaminations par rapport à un problème sans contrainte toxicologique. La consommation de jus de fruits est diminuée si on ne considère que les contraintes nutritionnelles alors qu'elle est augmentée avec l'ajout de contraintes sur l'exposition aux substances analysées. Ce dernier exemple montre l'importance des choix du paramétrage dans la définition du problème sur les solutions obtenues.

⁴ Cette méthode est décrite dans la partie Matériels et méthodes

Réduire la consommation d'aliments d'origines animales

Parallèlement, des études avaient pour objectif d'évaluer la durabilité, ou certains paramètres de la durabilité des régimes observés se différenciant par la quantité et le type de protéines apportées. En particulier, ces études ont par exemple évalué l'impact environnemental de régimes plus ou moins végétariens. Scarborough *et al.*, en utilisant les données de la cohorte EPIC-Oxford, ont évalué les émissions de gaz à effet de serre des régimes omnivores avec trois niveaux de consommation de viandes, de régimes contenant uniquement du poisson, de régimes végétariens et végétaliens (117). Ils montrent ainsi une forte association positive entre les émissions de gaz à effet de serre et les quantités de viande ou produits d'origine animale dans les régimes (117). Sur des données mondiales, Tilman et Clark ont évalué les conséquences de l'adoption de régimes méditerranéen, pescarien, végétarien et végétalien (118). Ainsi, l'adoption de ces régimes permettrait de réduire l'occupation des sols, les émissions de gaz à effet de serre et le risque de certaines maladies chroniques. Plus récemment, dans la cohorte NutriNet-Santé, la population a été divisée par quintile de score pro-végétarien de leur régime (119), définissant ainsi différents niveaux de végétalisation des régimes (120). Les résultats montrent que les personnes adoptant les régimes les plus végétaux induisent de plus faibles impacts environnementaux liés à leur régime, et obtiennent de meilleurs scores nutritionnels, tels que le PANDiet (score évaluant la probabilité d'adéquation avec les recommandations en nutriments) (121) ou le score d'adéquation aux recommandations du premier Programme National Nutrition Santé (120). L'avantage lié à l'utilisation du score pro-végétarien, plutôt que sur des régimes de type végétarien, est de considérer des régimes n'excluant pas totalement certains groupes d'aliments qui ont par ailleurs une importance culturelle et dont la production peut s'inscrire dans des cycles de production de type polyculture-élevage.

Une autre approche pour mesurer l'effet de la diminution des aliments d'origine animale consiste à tester des scénarios de substitution. Par exemple une étude sur les données de la cohorte EPIC des Pays-Bas montre que la substitution de 35g/jour de viandes avec des combinaisons d'aliments végétaux peut permettre de réduire les émissions de gaz à effet de serre des régimes de 12% (122). Cette approche a été reproduite sur des données de l'étude INCA2 (123), où la viande a été remplacée de manière isocalorique (pour s'affranchir des différences d'apport calorique) par d'autres groupes d'aliments. Les résultats montrent que ces substitutions pour la plupart permettent de diminuer les émissions de gaz à effet de serre des régimes, mais avec une intensité différente. De plus, si la viande est remplacée par des fruits et légumes de manière isocalorique, l'effet sur les émissions de gaz à effet de serre est négatif (124). En effet, les quantités de fruits et légumes à apporter pour couvrir les apports caloriques de la viande supprimée du régime seraient importantes.

Une autre étude originale a évalué comment atteindre les objectifs climatiques agricole et alimentaire, dans un contexte suédois. Les chercheurs ont ainsi proposé plusieurs scénarios de régimes : l'actuel (celui qui suit les tendances d'augmentation de la consommation de viande), un régime avec moins de viande, un autre proposant de la viande de bœuf provenant uniquement de systèmes de production de vaches laitières, végétariens (sans aliments provenant des ruminants), et végétaliens, avec plusieurs modèles de production (différenciant plusieurs niveaux d'usages de progrès technologiques et agronomiques) et différents niveaux de gaspillage (des grossistes et des consommateurs). Ainsi, cette étude montre que plusieurs solutions semblent envisageables pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Néanmoins, la combinaison de progrès agronomiques sur les méthodes de culture et d'élevage, ou la production d'énergie et de fertilisants et de changement de structure du régime permet de parvenir plus facilement aux objectifs (7). Une diminution drastique, voire un arrêt total de la consommation de viande ne serait donc pas indispensable. Aussi, les auteurs confirment que l'élevage de ruminants émet bien plus de gaz à effet de serre que ceux de volailles ou de porcs, en particulier à cause des différences d'efficacité de conversion alimentaire des animaux. Il est néanmoins souligné que les ruminants peuvent être nourris en partie avec de l'herbe ou des coproduits végétaux non consommés par les humains. Ce qui n'entre pas directement en compétition avec l'alimentation humaine.

Finalement, il semble important que la consommation de viande des populations occidentales soit réduite pour des raisons environnementales et de santé (pour les charcuteries et la viande de ruminants). Néanmoins, l'adoption par tous de régimes végétariens ou végétaliens ne semble pas indispensable et même souhaitable. De plus, la réduction de la consommation de produits animaux doit être accompagnée, car il existe une diversité de profils de consommation de protéines (125), et donc une diversité de modifications à proposer selon les profils.

Adopter un régime de bonne qualité nutritionnelle

Un certain nombre d'études ont évalué la durabilité de régimes alimentaires dont les qualités nutritionnelles sont déjà bien documentées (126). Notamment, certaines études se sont penchées sur l'analyse de la durabilité de régimes caractérisés par des scores nutritionnels comme le score d'adéquation aux régimes méditerranéens ou le score de réduction de l'hypertension. Sur les données d'EPIC-Norfolk, Monsivais a par exemple examiné les effets d'une large adoption d'un régime de type DASH (Dietary Approaches to Stop Hyperension) sur les émissions de gaz à effet de serre et le coût monétaire de l'alimentation (127). La durabilité des régimes méditerranéens a également été questionnée à de nombreuses reprises (128). Les résultats pour ces deux types de régimes montrent qu'ils sont moins émetteurs de gaz à effet de serre (118,129,130). Ce résultat est

souvent mis en relation avec leur plus faible quantité d'aliments d'origine animale (127,131). De plus, une méta-analyse conclut que le prix des régimes de bonne qualité nutritionnelle est légèrement plus élevé (132). Néanmoins, ce point ne fait pas consensus, car il dépend de la méthodologie de calcul et des régimes considérés. Saxe par exemple observe que l'adoption d'un régime nordique, caractérisé par plus d'aliments bruts de noix et fruits et légumes produits localement, pourrait représenter un gain économique (prix moins élevé) par rapport au régime actuel du pays (133). Concernant la dimension socio-culturelle, les régimes méditerranéens sont souvent présentés comme un héritage culturel des régions autour du bassin méditerranéen (134,135), qu'il faudrait préserver. Néanmoins l'évaluation d'autres aspects sociaux et culturels est peu présente dans les précédentes études et sur tous les types de régimes (136).

Les impacts environnementaux des régimes alimentaires recommandés par les institutions de santé ont aussi été évalués dans certains pays. Par exemple, sur des données néerlandaises, Van De Kamp montre que l'adéquation avec le régime recommandé aux Pays-Bas ne permet pas de diminuer de manière significative les émissions de gaz à effet de serre en comparaison avec le régime moyen (137). Néanmoins, il montre qu'en supprimant la viande ou en consommant des aliments à très faible impact carbone, il serait possible de diminuer les émissions du régime d'environ un tiers (137).

Des indicateurs nutritionnels ont également été utilisés pour discriminer les régimes et comparer leurs performances environnementales. Par exemple, Vieux *et al.* ont utilisé trois scores nutritionnels : le MAR (Mean Adequacy Ratio : score évaluant l'adéquation avec les apports minimums recommandés pour 20 nutriments), le Mer (Mean Excess Ratio : score évaluant le non-dépassement des apports maximums recommandés pour 3 nutriments) et la densité énergétique, mesurés sur les régimes des participants de l'étude INCA2 (138). Les régimes des personnes qui étaient au-dessus de la médiane pour les trois indicateurs ont été considérés comme de grandes qualités nutritionnelles, alors que ceux qui étaient au-dessus de 2, 1 ou aucune médiane sont dans les groupes : Intermédiaire I+, I-, ou de basse qualité nutritionnelle. Les résultats de cette étude montrent que les régimes considérés comme de grandes qualités nutritionnelles après ajustement sur l'apport énergétique sont responsables de plus d'émissions de gaz à effet de serre en comparaison avec les régimes considérés comme de basses qualités nutritionnelles (138). En effet, les régimes de plus grande qualité nutritionnelle contiennent moins de calories, la comparaison isocalorique est donc désavantageuse pour ces régimes. De plus, les productions des aliments à haute densité énergétique (soda, snack...), très consommés dans le groupe des personnes ayant un régime de basse qualité nutritionnelle, émettent peu de gaz à effet de serre et contiennent beaucoup de calories. Leur consommation apporte peu de nutriments intéressants, et donc leur non-

consommation présente un gain nutritionnel important et évite quelques impacts sur l'environnement.

Une autre approche consiste à utiliser plusieurs indicateurs pour constituer des groupes et ensuite comparer les régimes dans ces groupes. Par exemple, Masset *et al.* (139) ont construit des groupes en fonction des émissions de gaz à effet de serre des régimes et le score de probabilité de respecter les recommandations pour les nutriments, le PANDiet (121). Les régimes des personnes dont les scores sont au-dessus des médianes sont considérés durables. Ces régimes représentent uniquement le meilleur compromis entre deux indicateurs. Ainsi, dans cette étude, les régimes alimentaires les plus durables contiennent la même quantité d'aliments solides, mais apportent moins d'énergie, la densité énergétique du régime étant réduite, notamment par une consommation d'aliments d'origines végétales importante. Le coût monétaire évalué en masse du régime durable, défini dans cette étude est significativement plus bas. Mais si on ramène le prix à l'apport énergétique, nous n'observons plus de différence (139).

Briesbroek *et al.* a utilisé les mêmes types d'indicateurs, c'est-à-dire les émissions de gaz à effet de serre et l'adéquation aux recommandations nutritionnelles des Pays-Bas (140). Ils ont choisi d'utiliser la méthode de régression des rangs réduits (RRR) pour identifier plusieurs modèles de régime. C'est-à-dire des combinaisons linéaires de groupes d'aliments qui maximisent l'explication des variables réponses ici le score d'adéquation aux recommandations nutritionnelles des Pays-Bas et les émissions de gaz à effet de serre attribuables au régime. Ainsi, par cette méthode, ils identifient deux types de régimes (ou patterns) (140). Un premier régime nommé « plant-based », se caractérise par une forte contribution dans le régime des fruits et légumes, aliments à base de soja, légumineuses, gâteaux et tartes, et poissons maigres et une faible contribution des sodas, boissons alcoolisées, frites et viande. Le deuxième régime nommé "dairy-based", se caractérise par d'importantes quantités de fromages, produits laitiers, noix et graines alors qu'il contient peu de thé et café, soda, pains blancs, aliments à base de soja, matières grasses et sauces. L'étude de ces régimes montre de bonnes caractéristiques nutritionnelles pour les deux, néanmoins seul le pattern « plant-based » présente des avantages pour réduire les émissions de gaz à effet de serre attribuable à la production du régime (140).

Récemment, la commission EAT-Lancet a travaillé sur les modifications de régimes à mettre en place pour parvenir à répondre aux enjeux environnementaux et de santé. Ils ont commencé par proposer un régime sain pour la santé. Ainsi, ce régime par rapport à la tendance actuelle contient beaucoup moins d'aliments connus pour leurs effets néfastes sur la santé, mais plus de légumineuses, noix,

fruits et légumes. L'ampleur des modifications diffère selon les niveaux initiaux de consommation des régions du monde, comme le montre la Figure 10.

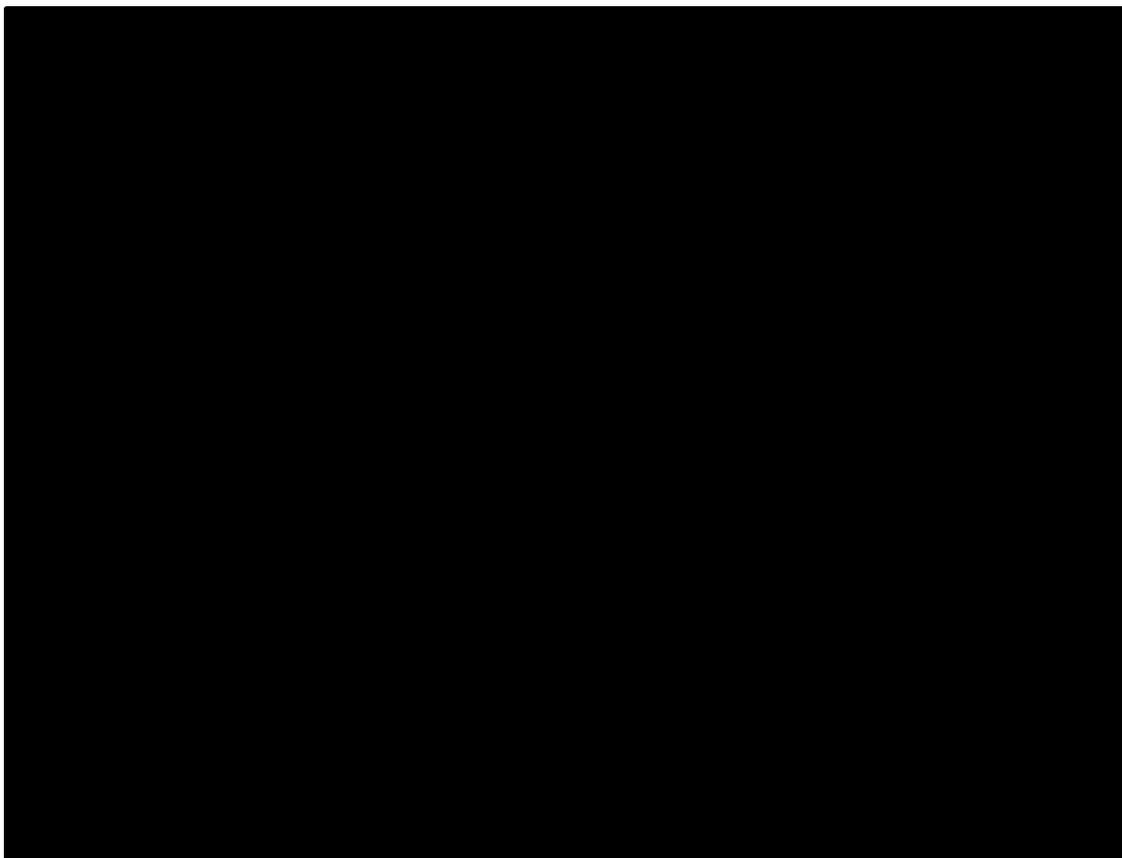


Figure 10: Différences de consommation entre les régimes alimentaires actuels en 2016 et le régime de référence

La commission a quantifié les bénéfices pour la santé de ce régime mondial à la fois en s'assurant qu'il couvre bien les besoins en nutriments et en prédisant les effets sur la mortalité. Ainsi, l'adoption de ce régime par tous éviterait en 2030, 11,1 millions de morts, soit une réduction de la mortalité prématurée de 19% (60). De plus, la commission s'est assuré que la production de ce régime n'induirait pas de dépassements des limites naturelles suivantes : émissions de gaz à effet, occupation des terres, eau, flux d'azote et de phosphore et biodiversité. Leur conclusion est que pour ne pas dépasser les limites planétaires, il serait nécessaire non seulement de changer la structure des régimes alimentaires, mais également d'adopter des modifications dans la manière de produire les aliments et de réduire les pertes et gaspillages.

Finalement, il ressort de ces études que l'adoption d'un régime reconnu pour sa qualité nutritionnelle est dans la plupart des cas favorable à la protection de l'environnement (129,130,141), mais ils peuvent aussi ne pas présenter de bénéfices par rapport aux régimes actuels voir être délétères (141). Les précédentes études montrent aussi que les régimes alimentaires peu impactant pour l'environnement sans considération nutritionnelle peuvent être très délétères pour la santé

(138). Ainsi, afin que les dimensions « nutrition » et « environnement » soient en cohérence pour améliorer la durabilité des régimes, il est nécessaire de chercher des compromis en appréhendant dans le détail les substitutions entre groupes alimentaires, qui peuvent induire des effets contre-productifs (141). La dimension économique n'est pas systématiquement prise en compte (136) et lorsque c'est le cas, on n'observe pas de consensus dans les résultats. Enfin, la dimension socio-culturelle n'est presque jamais considérée (136).

Consommer des aliments issus de l'agriculture biologique

En 2014, Saxe a étudié les impacts environnementaux d'un nouveau régime nordique, caractérisé par moins de bœuf, de veau, de poulet, mais plus de mouton nourri à l'herbe et de gibiers, avec des baies et peu de tomates et concombre, une consommation occasionnelle de produits importés (café, thé, cacao, vins, bière et alcool fort), dans plusieurs scénarios (133). Un des scénarios impose que 84% des aliments du régime nordique soient issus de l'agriculture biologique, alors que le régime de référence, basé sur les consommations actuelles en contient 8%. Il montre que dans le scénario prenant en compte l'agriculture biologique, 10 indicateurs environnementaux sont toujours plus faibles pour le nouveau régime nordique alors que 6 sont en défaveur du nouveau régime nordique (133). En comparant les scénarios, il observe que les bénéfices obtenus sur la pollution de l'air, l'occupation des sols et les émissions de gaz à effet de serre du nouveau régime nordique sont diminués par rapport à un scénario qui ne considère pas les aliments biologiques (133). Comme attendu, le gain économique d'adopter un régime nordique est plus faible s'il est composé à 84% d'aliments issus de l'agriculture biologique. Ces résultats sont essentiellement expliqués par la productivité plus faible de l'agriculture biologique. Néanmoins, cette étude se base sur des régimes théoriques, le choix des pourcentages de produits biologiques étant arbitraire et appliqué à tous les groupes d'aliments. L'auteur montre aussi que certains aliments biologiques ont de meilleures performances environnementales que leur homologue conventionnel. Ainsi, les potentiels bénéfices environnementaux de l'agriculture biologique seraient dépendants des choix et de la composition du régime. Il est donc essentiel d'observer et de comparer des régimes réels.

Les émissions de gaz à effet de serre et l'utilisation des terres des régimes conventionnels et biologiques ont été comparées, en utilisant les données de l'étude nationale allemande NVSII (142). Dans cette étude, les régimes dits « biologiques » sont ceux des plus grands consommateurs d'aliments biologiques de la cohorte. Pour la présente analyse, ces régimes sont théoriquement constitués uniquement d'aliments biologiques, bien qu'en réalité certains aliments soient conventionnels. Les résultats montrent que les régimes biologiques contiennent en moyenne 45% de viande en moins. Il n'y a pas de différence dans les émissions de gaz à effet de serre liées à la

production des régimes conventionnels ou biologiques. De plus, la production de régimes biologiques nécessite 40% de surface en plus (142). Ces résultats sont expliqués par des cycles de production souvent plus extensifs en agriculture biologique nécessitant par exemple de fournir des aliments aux animaux plus longtemps, ce qui annulerait les plus faibles impacts quotidiens de l'agriculture biologique. En Allemagne, les filières biologiques sont moins efficaces que les filières conventionnelles. Elles nécessitent davantage de transport et doivent faire appel à des exportations (142). Néanmoins, il est nécessaire de relativiser ces résultats, car les régimes entièrement biologiques sont très rares et donc, le régime biologique considéré dans cette étude reste théorique. Les auteurs supposent que dans la réalité, les régimes uniquement biologiques sont davantage végétaux que ceux considérés dans cette étude.

Dans la cohorte NutriNet-Santé, un travail a consisté à estimer les impacts environnementaux des régimes biologiques en fonction de leur niveau de végétalisation (120). Cette étude montre un effet positif des régimes biologiques sur les indicateurs environnementaux, mais uniquement chez les personnes avec un régime très végétalisé (120).

Concernant les autres aspects de la durabilité, sur les données de la cohorte NVSII, des chercheurs ont montré que les personnes se procurant fréquemment de nombreux aliments issus de l'agriculture biologique sont plus propices à suivre les recommandations pour être en bonne santé, notamment celles concernant la qualité nutritionnelle de leur régime (143). Enfin, l'analyse des données de la cohorte NutriNet-Santé montre que les régimes avec une importante contribution d'aliments issus de l'agriculture biologique (comparés par quintile) sont plus proches des recommandations nutritionnelles, ont des impacts environnementaux plus faibles et exposent les mangeurs à moins de résidus de pesticides. Ces régimes sont néanmoins plus chers (144). Les effets du mode de production et de composition des régimes ont été décomposés. Le mode de production biologique a un effet principalement sur l'exposition aux résidus de pesticides et le prix, alors que la composition des régimes influe majoritairement sur la diminution des impacts environnementaux (144).

c/ Lien entre régimes alimentaires plus durables et la santé

L'évaluation des bénéfices pour la santé à long terme, en dehors de la nutrition, de l'adoption de comportements alimentaires jugés plus durables n'est pas courante. Certaines études ont estimé ces bénéfices par l'étude de scénarios ou l'évaluation d'associations.

Certaines études portent sur l'évaluation des bénéfices pour la santé de la réduction de la consommation de viande (118), viande rouge (145) ou de l'adoption de régimes de type végétarien (118,146,147). La réduction de la consommation de viande rouge ou de produits d'origine animale pour des populations occidentales apporterait des bénéfices pour la santé. Ces comportements diminueraient les risques de maladies cardiovasculaires, du cancer du côlon ou du diabète de type II (118,145,147). Sur des données américaines et canadiennes, Soret *et al.* montrent une diminution de la mortalité par rapport à l'adoption de régimes omnivores. Les rapports de risque des modèles principaux sont de 0,86 pour les régimes flexitariens (moins d'une portion de viandes par semaine, mais plus d'une portion par mois) et de 0,91 pour les régimes végétariens en prenant le régime omnivore comme référence⁵ (146). Une réduction forte de la consommation de viandes apporterait des bénéfices pour la santé un peu plus élevés que leur exclusion totale (146). L'enjeu pour la santé des régimes végétariens est de parvenir à couvrir les besoins pour les nutriments très présents dans la viande, le poisson et les œufs ou pour les nutriments dont la bioaccessibilité est meilleure pour les aliments d'origine animale que pour les aliments d'origine végétale.

De la même manière, une très récente étude a montré sur des données de France, du Royaume-Unis, de l'Italie, de Suisse et de Finlande qu'un régime alimentaire respectant les recommandations nutritionnelles permet d'augmenter le nombre de jours en bonne santé (DALYs) (148). De plus, imposer simultanément à ces régimes de réduire les émissions de gaz à effet de serre, ne réduit pas les bénéfices sur les DALYs obtenus précédemment. Finalement, l'adoption massive de régimes à faible bilan carbone permettrait d'augmenter l'espérance de vie de 2,3 à 6,8 mois par personne selon les pays (148). Milner montre par simulation que l'adoption par l'ensemble de la population britannique de régimes alimentaires respectant les recommandations de l'Organisation mondiale pour la Santé (OMS) pourrait permettre de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 17% (149). Sur les trente prochaines années, ce régime permettrait de sauver 7 millions d'années de vie perdues prématurément et d'augmenter l'espérance de vie d'environ 8 mois (149). La commission EAT-lancet a également estimé que l'adoption du régime mondial proposé permettrait d'éviter en 2030, 11,1 millions de morts, ce qui est équivalent à une réduction de la mortalité prématurée de 19% (60).

Néanmoins, sur des régimes alimentaires observés dans la cohorte EPIC des Pays-Bas, des chercheurs n'ont pas trouvé d'association après un suivi d'une quinzaine d'années entre des régimes à faibles émissions de gaz à effet de serre ou nécessitant peu de terre et la mortalité (122). Seuls, des régimes

⁵ Ces résultats signifient que le risque de mortalité est diminué de 14% pour les personnes adoptant un régime flexitarien et de 9% pour ceux qui ont adopté un régime végétarien.

alimentaires où 35g de viande seraient remplacés avec des légumes, des fruits secs, des féculents ou du poisson, diminueraient significativement le risque de mortalité (122).

Dans ces études les modes de production des aliments ne sont pas considérés. Les associations entre l'adoption de régimes alimentaires composés en grande partie par des aliments issus de l'agriculture biologique et certaines maladies chroniques sont de plus en plus étudiées. Il y a déjà quelques années, une association négative entre la consommation d'aliments biologiques et le développement du lymphome non-hodgkinien avait été trouvée chez des participantes de la cohorte Million women study au Royaume-Uni, alors qu'aucune association n'avait été trouvée pour les autres cancers (74). Au sein de la cohorte NutriNet-Santé, une association négative entre la consommation de produits biologiques et le développement de lymphome et de cancer du sein a été observée (73). Il a aussi été montré que parmi les grands consommateurs d'aliments biologiques moins ont un syndrome métabolique (72). Le syndrome métabolique regroupe des éléments physiologiques augmentant le risque de développer une maladie cardiovasculaire et un diabète de type II. De plus, les risques de survenu de l'obésité et du surpoids étaient plus faible chez les consommateurs de produits biologiques par rapport à ceux qui en consommés peu (64).

Les résultats de ces quelques études semblent montrer que l'adoption de régimes alimentaires plus durables apporterait des bénéfices pour la santé. Cependant, très peu d'études apportent des résultats venant de régimes alimentaires observés. Il est donc important d'obtenir de nouveaux éléments pour confirmer ou infirmer ces premiers résultats basés majoritairement sur des scénarios. Un bon nombre d'études n'a étudié que les effets sur la santé de régimes alimentaires plus pauvres en produits animaux. L'étude des effets de la consommation d'aliments biologiques reste très parcellaire.

Bien que ces deux paramètres puissent être importants pour améliorer la durabilité des régimes alimentaires, d'autres modifications dans les systèmes et régimes alimentaires contribuent à l'amélioration de leur durabilité. À notre connaissance, aucune étude n'a évalué les associations entre la durabilité de l'alimentation définie par une approche multicritère et le développement de maladies ou des indicateurs de l'état de santé.

4) Bilan de l'introduction

Dans cette introduction, nous avons présenté les principaux arguments mettant en évidence que le système alimentaire global n'est pas durable. Ces arguments concernent plusieurs domaines : l'environnement, la santé, la répartition de la valeur et les aspects sociaux. Les constats étant faits, nous avons exposé le contexte et le cadre ayant donné naissance à une définition internationale de l'alimentation durable. En troisième partie, nous avons présenté les principaux résultats de manière brève sur les leviers pour améliorer la durabilité de l'alimentation. Ainsi, nous avons noté que la modification des régimes alimentaires revenait très fréquemment, dans les leviers d'actions. À la fin de cette introduction, nous avons alors proposé un état de l'art des études sur la durabilité des régimes alimentaires. Ce travail nous a permis de constater que certaines questions avaient déjà été bien étudiées comme la réduction de la consommation de produits animaux, ou encore l'évaluation de la durabilité de régimes conçus pour améliorer la santé. Ce travail a souligné qu'actuellement la durabilité des régimes alimentaires était considérée uniquement à partir de quelques indicateurs, les émissions de gaz à effet de serre pour l'environnement, des scores de qualité des régimes notamment, en laissant de côté d'autres indicateurs tout aussi importants. Aussi, le chapitre décrivant les résultats sur les liens entre alimentation durable et santé montre que les précédents résultats s'appuient également sur une définition des régimes alimentaires durables considérant peu d'indicateurs. Enfin, beaucoup d'études sont basées sur des scénarios et, à notre connaissance, aucune méta-analyse ou revue de la littérature n'a pu synthétiser les résultats sur la question des associations entre régimes alimentaires plus durable et la santé.

II- Objectifs de la thèse

Au vu de la littérature scientifique, nous avons identifié trois principales questions de recherche, présentées dans le schéma ci-dessous.

Ainsi, l'objectif général de la thèse est l'étude des impacts individuels et sur l'environnement des régimes alimentaires afin d'identifier les meilleurs compromis et des modèles optimaux de régimes individuels durables sur le plan nutritionnel, environnemental et économique, en identifiant les leviers d'actions et freins aux développements de ces régimes.

Dans l'objectif de répondre à cet objectif général, nous l'avons décomposé en sous-objectifs (présentés sur le schéma ci-dessous). Les résultats de ces sous-objectifs ont été valorisés dans plusieurs articles et lors de congrès.

Dans la suite de ce manuscrit, après avoir présenté notre matériel et les principales méthodes de travail, nous présenterons les résultats des deux premiers sous-objectifs dans le quatrième chapitre, puis le troisième sous-objectif dans le chapitre cinq et enfin les résultats du dernier sous-objectif sont présentés dans le sixième chapitre. Dans une dernière partie, nous ferons une discussion générale de l'ensemble des résultats de cette thèse, pour conclure sur les implications et les perspectives de la thèse.

Question de recherche 1 : Quelles sont les caractéristiques des régimes alimentaires présentant un bon compromis entre les différentes dimensions de la durabilité des régimes alimentaires ?

Question de recherche 2 : Les régimes présentant un compromis durable sont-ils protecteurs pour la santé ?

Question de recherche 3 : Quels seraient les leviers pour que des régimes soient acceptables et optimaux sur les plans nutritionnels et environnementaux ?

Objectif de la thèse : Étudier les impacts individuels et sur l'environnement des régimes alimentaires afin d'identifier des compromis et des modèles optimaux de régimes durables sur le plan individuel, environnemental et économique, et identifier les leviers d'actions aux développements de ces régimes.

Objectif 0 : Traitement des données et description des méthodes

Partie III

Objectif 1 : Identification des meilleurs compromis de régimes durables par des méthodes supervisées et non supervisées

Partie III

Objectif 2 : Analyse et description de ces régimes sur des critères environnementaux, monétaires et nutritionnelles

Objectif 3 : Étude des associations entre ces compromis de régime et la survenue de différents événements de santé

- Statut anthropométrique
- Maladies chroniques

Partie IV

Objectif 4 : Recherche de régimes optimum pour la durabilité à partir des régimes observés afin d'identifier les principales modifications.

Partie V

III- Matériels et méthodes

1) Présentation générale de l'étude NutriNet-Santé et du projet

BioNutriNet

a/ La cohorte NutriNet-Santé

L'ensemble des résultats de cette thèse a été obtenu grâce aux données de la cohorte NutriNet-Santé. L'étude a commencé en 2009. Elle a comme objectif de collecter par internet des informations pour étudier prospectivement les relations entre la nutrition et la santé ainsi que les déterminants des comportements alimentaires dans une large population d'adultes vivant en France (150). Pour le lancement, une vaste campagne multimédia à destination du grand public, relayée par de nombreux canaux professionnels, a permis de faire connaître la cohorte et de motiver des volontaires. Le recrutement se poursuit encore aujourd'hui, car il s'agit d'une cohorte dynamique.

Les conditions pour participer à l'étude impliquent d'être âgé d'au moins 18 ans, de disposer d'une connexion Internet et d'une adresse mail et de remplir les cinq questionnaires d'inclusion décrits plus loin dans cette partie. Aussi, chaque participant doit signer un consentement électronique. Les questionnaires sont complétés directement sur le site de l'étude : www.etude-nutrinet-sante.fr dans une interface HTML garantissant la sécurité informatique et physique des données. L'étude a reçu un avis favorable du Comité de Qualification Institutionnelle (IRB) de l'INSERM le 10 juillet 2008 (n°IRB0000388FWA00005831), du CCTIRS le 11 juillet 2008 (n°08.301) et de la CNIL le 24 février 2009 (n°908450). Elle respecte également les recommandations de la déclaration d'Helsinki. L'étude possède le numéro suivant de ClinicalTrials.gov NCT03335644.

Un set de cinq questionnaires est proposé aux volontaires souhaitant participer à l'étude. Ce set se compose de trois enregistrements des consommations alimentaires de 24h sur quinze jours, d'un questionnaire sur l'activité physique, d'un relevé des mesures anthropométriques, d'un questionnaire sur les caractéristiques sociodémographiques et de modes de vie ainsi qu'un dernier sur l'état de santé (pathologies, antécédents et prises de médicaments). Les volontaires sont inclus une fois que les cinq questionnaires sont complétés. Ensuite, tous les ans, à leur « date anniversaire » d'entrée dans la cohorte, les volontaires reçoivent un mail pour leur demander de mettre à jour les données recueillies dans les questionnaires. Aussi tous les six mois, les participants sont sollicités pour effectuer trois nouveaux enregistrements de 24h de leur consommation alimentaire.

À côté de ces questionnaires principaux, d'autres questionnaires optionnels sont envoyés régulièrement aux participants. Ces questionnaires optionnels portent sur divers sujets et permettent d'étudier plus précisément des états de santé, des déterminants ou comportements en lien avec l'alimentation ou l'activité physique.

Le maintien et l'implication des volontaires sur le long terme dans l'étude sont un enjeu majeur pour le laboratoire, d'autant plus que les participants ne bénéficient jamais de retours individuels sur les réponses aux questionnaires. Ces retours pourraient les motiver à poursuivre, mais aussi les pousser à modifier leurs comportements et donc compromettre l'aspect observationnel de l'étude. Ainsi, d'autres moyens sont mis en place pour maintenir un nombre suffisant de volontaires actifs. Des informations, résultats et nouvelles de l'étude sont diffusés sur les réseaux sociaux, par une newsletter ou sur le site de l'étude. Une association des « Nutrinautes » a aussi été créée. Cette année, à l'occasion des dix ans de la cohorte, l'équipe a également organisé quelques événements anniversaires.

Dans le cas d'une absence de réponse de la part d'un volontaire pendant plus de 6 mois, une procédure est lancée. Cette procédure consiste à envoyer aux participants un mail de relance. Si ce mail est sans retour, le volontaire peut être contacté par téléphone pour l'inciter à poursuivre l'étude. Des procédures allégées peuvent alors lui être proposées.

Le 20 juin 2019, il y avait dans la cohorte NutriNet-Santé 283 231 participants inclus, dont 151 413 comptes actifs.

b/ Le projet BioNutriNet

La thèse s'appuie sur de nombreuses données collectées dans le cadre du projet BioNutriNet : *consommation d'aliments issus de l'agriculture biologique : déterminants et motivation vis-à-vis de la durabilité, impact nutritionnel, économique, environnemental et toxicologique*. Ce projet multidisciplinaire et financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le contexte du programme ALID système Alimentaire Durable (ANR-13-ALID-0001) s'est déroulé de janvier 2014 à décembre 2018. Il s'est articulé autour de cinq volets coordonnés par l'Équipe de Recherche en Épidémiologie Nutritionnelle (EREN). De nombreux partenaires académiques et associatifs ont participé à ce projet multidisciplinaire.

L'objectif du projet BioNutriNet était de comprendre et de caractériser les consommations et les consommateurs d'aliments issus de l'agriculture biologique dans un large échantillon et d'en estimer

les impacts environnementaux, économiques et toxicologiques. Ainsi, les consommations alimentaires précises en aliments issus des agricultures biologique et conventionnelle ont été estimées à un niveau individuel auprès des volontaires de la cohorte NutriNet-Santé. L'objectif était de décrire les apports en nutriments, l'adéquation avec les recommandations ou les profils sociodémographiques, psychologiques et économiques en fonction des niveaux de consommation d'aliments issus de l'agriculture biologique. Des données d'impacts de la production sur l'environnement (les émissions de gaz à effet de serre, le besoin en énergie et en surface agricole), la présence de résidus de contaminants et le prix des aliments en distinguant les modes de production biologique ou conventionnelle ainsi que les lieux d'approvisionnements pour les prix des aliments ont été recueillies dans le cadre de ce projet. Enfin, des données biologiques ont été collectées sur un sous-échantillon, puis dosées, afin de mieux caractériser l'exposition aux résidus de contaminants et le statut nutritionnel en fonction du niveau de consommation d'aliments biologiques des participants.

La thèse ne s'inscrit pas dans le cadre du projet BioNutriNet. Néanmoins une partie du travail et des données collectées ont permis la réalisation de la thèse. Dans la partie suivante, nous décrirons en détail le recueil et le traitement des données utilisés lors de la thèse.

2) Recueil et traitement des données individuelles

a/ Données alimentaires distinguant les modes de production biologiques ou conventionnels

Entre juin et décembre 2014, un questionnaire de fréquence alimentaire semi-quantitatif pour quantifier les apports en aliments issus de l'agriculture biologique (FFQ bio : Food Frequency Questionnaire Bio) au cours des 12 derniers mois a été envoyé aux participants inclus dans l'étude NutriNet-Santé afin d'estimer de manière détaillée les consommations alimentaires usuelles et la part relative des aliments biologiques dans le régime (151). Ce questionnaire se base sur un autre questionnaire de fréquence alimentaire auto-administré dont la reproductibilité et la validité relative ont été testées par rapport à des enregistrements de 24h répétés (152). Ces tests sur ce premier questionnaire de fréquence alimentaire dans la cohorte NutriNet-Santé ont montré une reproductibilité et une validité relative acceptable.

Le questionnaire proposé aux participants (FFQ bio) portait sur les apports alimentaires habituels. Toutes les prises alimentaires étaient considérées (à domicile, à l'extérieur, lors des repas et en dehors). Le questionnaire portait sur 264 items courants (boissons et aliments) regroupés en

catégorie. Pour chaque item, les participants devaient renseigner la fréquence de consommation (par jour, semaine, mois ou année) ainsi que la quantité généralement consommée. Pour les aider à estimer les proportions, des tailles standards de portions (ex. : mesures ménagères) ou des photos de portions (pour les fromages, les pâtés, les produits de la mer, la viande, le beurre à tartiner, les pommes de terre, féculents et les légumes) leur étaient proposées. De plus, étant donnée la grande diversité de composition des beurres et margarines, il était demandé aux participants de choisir entre 20 beurres ou margarines ceux ou celles utilisés pour les tartines et pour la cuisson. Finalement, en multipliant la fréquence journalière de consommation de chacun des items par les quantités apportées par portion, nous obtenons les apports moyens journaliers pour chaque item en gramme.

Enfin, les participants devaient renseigner la fréquence selon laquelle les items étaient consommés en biologique, via une échelle ordinale à 5 modalités (jamais, rarement, la moitié du temps, souvent et toujours). Il était précisé que les aliments issus de l'agriculture biologique étaient ceux avec un label de l'agriculture biologique reconnu par l'Union européenne. Ce qui exclut les aliments autoproduits, par exemple. Pour 6 items n'existant pas en agriculture biologique (les yaourts à l'aspartame, l'eau de source, l'eau minérale, l'eau du robinet, les sodas light et les substituts de viande), la question n'était pas posée.

Des pondérations de : 0 ; 0,25 ; 0,5 ; 0,75 et 1 ont été allouées respectivement aux modalités « jamais », « rarement », « la moitié du temps », « souvent » et « toujours » afin d'estimer la part issue de l'agriculture biologique pour chacun des items. L'objectif de ces pondérations était de permettre d'estimer les quantités consommées en agriculture biologique et en conventionnelle. Des analyses de sensibilités ont été réalisées pour tester l'effet du choix arbitraire de ces pondérations. Les résultats montrent un faible impact du choix des pondérations sur la manière de classer les personnes par la consommation de produits issus de l'agriculture biologique (151).

Nous avons défini la consommation en aliments issus de l'agriculture biologique comme étant la somme des quantités (en gramme) des items consommés en agriculture biologique. Nous avons également calculé le ratio entre la consommation d'aliments biologiques (en gramme) et le total d'aliments ingérés (en gramme) afin d'obtenir une part relative de contribution des aliments biologiques dans le régime.

Une table de composition des aliments de l'étude NutriNet-Santé existe et est mise à jour régulièrement, elle contient les compositions nutritionnelles de plus de 3500 aliments français (153).

Un item du FFQ bio pouvait correspondre à plusieurs aliments ; des rappels de 24h ayant des compositions légèrement différentes. Ainsi, une table de composition nutritionnelle ad hoc a été mise au point, en pondérant les différents aliments possibles pour un item par la fréquence de consommation spécifique au sexe (homme, femme) déclarée par l'ensemble des Nutrinautes dans les enregistrements de 24h.

Il est important de noter que, à cause de l'absence de données disponibles nous n'avons pas distingué la composition nutritionnelle des items en fonction de leur mode de production, des saisons ou du lieu d'achat.

Les apports journaliers en calories et en nutriments principaux ont ainsi pu être estimés individuellement. Des scores génériques d'évaluation de la qualité nutritionnelle des aliments et d'autres indicateurs ont été considérés :

- Le **PANDiet** (121) évalue la probabilité d'adéquation aux besoins moyens estimés en nutriments d'après les recommandations officielles françaises. Pour chaque nutriment, une probabilité d'adéquation est mesurée en utilisant la fonction probnorm de SAS®. Deux sous-scores sont ainsi mesurés, un sous-score d'adéquation reflétant la probabilité que les apports en nutriment soient au-dessus des valeurs minimales requises et un deuxième sous-score de modération évaluant la probabilité que les apports restent en dessous des valeurs maximales requises, ainsi que des points de pénalité pour les nutriments dont les apports dépassent rarement les seuils. Le score final (sur 100) est la moyenne des deux sous-scores. Nous avons adapté le score pour qu'il puisse être calculé à partir des données issues du FFQ bio en considérant l'absence de variabilité intra-individuelle, car le FFQ bio mesure les apports usuels sur l'année. Nous utilisons dans cette thèse la deuxième version (121) et la troisième version du PANDiet (125). Dans la seconde version, les nutriments considérés dans le sous-score d'adéquation sont : les protéines, les glucides totaux, les lipides totaux, les acides gras polyinsaturés, les acides gras n-3, les acides gras n-6, les fibres, les vitamines A, B1, B2, B3, B6, B6, B9, B12, C, D, E, le calcium, le magnésium, le zinc, le phosphore, le potassium, le fer, l'iode et le sélénium. Le sous-score de modération considère : les protéines, les lipides totaux, les acides gras saturés, les glucides, le cholestérol et le sodium et en pénalité : le rétinol, la niacine, les vitamines B6, C, D, E, les folates, le calcium, le magnésium, le zinc, le phosphore et le fer. Dans la troisième version, les nutriments considérés dans le sous-score d'adéquation sont : les protéines, les lipides, les oméga 3 (ALA et DHA), oméga 6, EPA-DHA, les fibres, les vitamines A, B1, B2, B3, B5, B6, B9, B12, C, D et E, le calcium, le fer, l'iode, le fer,

le magnésium, le manganèse, le phosphore, le potassium, le sélénium et le zinc. Le sous-score de modération considère : les protéines, les lipides totaux, les acides gras saturés, les glucides, le cholestérol, les glucides sans lactose et le sodium et en pénalité : les vitamines B3, B6, B9, D et E, le calcium, l'iode, le magnésium, le zinc, et le sélénium.

- La **densité énergétique** du régime est égale au nombre de calories apportées par 100 grammes de régime.
- Le **mPNNS-GS** (154) est un score créé pour refléter l'adéquation du régime au repère nutritionnel de 2001 dans le cadre du Programme National Nutrition Santé (PNNS). Il est basé sur la consommation des groupes alimentaires ou nutriments suivant : Fruits et légumes, féculents, aliments céréaliers complets, produits laitiers, viandes, poissons et fruits de mer, matière grasse ajoutée, sucrerie, boisson, alcool, et le sel. Le score prévoit des pénalités pour les personnes dont l'apport énergétique est supérieur à 105% du besoin énergétique estimé.
- Le **score provegetarian** (119) a été élaboré de manière à refléter le niveau de végétalisation des régimes alimentaires. Il est ainsi composé de sept groupes d'aliments d'origine végétale et de cinq groupes d'aliments d'origine animale. Un ajustement sur le sexe et sur l'apport énergétique total en utilisant la méthode des résidus (155) a été effectué pour estimer la moyenne de consommation de chaque groupe d'aliments. Des points de 1 à 5 sont attribués par quintile pour chaque groupe d'aliments d'origine végétale et l'attribution des points (de 1 à 5) pour les groupes d'aliments d'origine animale. Le score total est obtenu en additionnant l'ensemble des points, ainsi, le score varie de 12 (faible consommation d'aliments d'origine végétale) à 60 (forte consommation d'aliments végétaux).

b/ Données sur les comportements et préférences alimentaires

Un second questionnaire, développé dans le cadre du projet BioNutriNet, portait sur les attitudes, les perceptions et pratiques d'achats des participants vis-à-vis de l'agriculture biologique. Les deux questionnaires (le FFQ bio et le questionnaire sur les comportements) ont été posés en même temps, entre juin et décembre 2014.

Parmi les parties du questionnaire utilisées lors de cette thèse, une était consacrée aux lieux d'approvisionnements alimentaires. Les participants devaient renseigner leurs deux principaux lieux d'approvisionnement pour 31 groupes d'aliments, en fonction des modes de production (biologique ou conventionnelle). Les lieux suivants leur étaient ainsi proposés : à la ferme, auprès d'un artisan, à l'épicerie dans une grande ou moyenne surface, dans un hard discount, dans un magasin ou

association de producteurs, paniers ou AMAP (association pour le maintien d'une agriculture paysanne), marché, ou magasin spécialité en aliments biologiques.

Une autre question portait sur la consommation d'aliments préparés incluant les aliments surgelés, les conserves et autres plats cuisinés. Les participants devaient pour ces trois types de produits renseigner la fréquence de consommation via 5 modalités (jamais, rarement, la moitié du temps, souvent et toujours). Tout comme pour l'évaluation de la contribution des aliments biologiques dans le régime, des pondérations de : 0 ; 0,25 ; 0,5 ; 0,75 et 1 ont été allouées respectivement aux modalités « jamais », « rarement », « la moitié du temps », « souvent » et « toujours », puis les points ont été additionnés afin d'estimer la contribution des aliments préparés dans le régime.

c/ Données de santé

Le questionnaire de santé contenu dans le set des cinq questionnaires d'inclusion permet de recueillir de nombreuses informations sur la santé des participants et de leur famille. En particulier, ce questionnaire permet de collecter les antécédents de maladies chroniques personnels et familiaux, les hospitalisations, les prises de médicaments, les coordonnées du médecin généraliste ainsi que pour les femmes des informations sur la vie hormonale comme les règles, l'usage de contraceptifs, les grossesses, ou encore la ménopause. Ce premier questionnaire proposé à l'inclusion est mis à jour régulièrement. Les participants sont aussi invités à saisir directement les événements de santé, les nouveaux traitements ou examens de santé lorsqu'ils surviennent.

Certaines données déclarées par les sujets sont ensuite validées par consensus auprès d'un comité de médecins du laboratoire. Les validations sont réalisées grâce aux comptes rendus anatomopathologiques et autres documents médicaux. L'équipe ayant obtenu le droit de collecter le numéro de sécurité sociale des participants peut ainsi compléter ou valider certaines informations par ce biais et par un accès aux bases du SNIIRAM. La procédure du Décret 98-37 donne à l'équipe l'accès au répertoire national d'identification des personnes physiques et aux données de la base CépiDC de l'INSERM afin de collecter le statut vital et les causes de décès des participants. Les cas de cancers et de maladies cardiovasculaires sont classés selon la Classification statistique internationale des maladies et des problèmes de santé connexes, 10^{ème} révision, Modification clinique (156).

Les participants sont également invités tous les ans à renseigner leur taille et masse dans le questionnaire d'anthropométrie. Il est demandé aux participants de donner préférentiellement les valeurs prises par un professionnel de santé, mais, si les participants n'ont pas de données récentes, des conseils et consignes leur sont fournis afin qu'ils puissent prendre eux-mêmes leurs mesures.

Une étude de validation a été effectuée peu de temps après le lancement de la cohorte, afin de s'assurer que les valeurs collectées par internet, lors d'un entretien ou celles mesurées par un professionnel de santé sont concordantes (157). Lors de cette étude de validation, 2513 participants ont rempli un questionnaire anthropométrique en ligne 3 jours avant un examen clinique où les mesures anthropométriques étaient collectées. De plus, sur les 2513 participants, 815 ont également répondu à un entretien anthropométrique en face à face. Les résultats font ressortir que l'auto-déclaration sur internet introduit une légère sous-déclaration de la masse et une sur déclaration de la taille, en comparaison avec la prise des mesures par un professionnel de santé, entraînant une sous-déclaration de l'IMC ($P < 0,05$) chez les hommes et les femmes : $-0,32 \text{ kg/m}^2$ (écart-type 0,66) et $-0,34 \text{ kg/m}^2$ (écart-type 1,67), respectivement. Toutefois, une concordance presque parfaite a été observée entre les données collectées en ligne et celles obtenues lors d'un entretien avec un professionnel. Les différences de classement des personnes par statut anthropométrique de l'OMS (sous poids, poids normal, surpoids et surpoids avec obésité) étaient très rares, puisque les coefficients intra-classes variaient de 0,96 à 1,00, l'accord de classification était de 98,5 % et le coefficient de kappa de 0,97.

d/ Recueil des données relatif au statut socioéconomique et aux modes de vie

Les données socioéconomiques et de modes de vie sont recueillies grâce à un questionnaire faisant partie du set des cinq questionnaires d'inclusion et mis à jour tous les ans. Les questions concernent le statut matrimonial, la situation familiale (taille et composition du ménage), le statut professionnel (catégorie socioprofessionnelle, profession et statut face à l'emploi), le diplôme académique le plus élevé obtenu, les revenus du ménage, ainsi que les consommations individuelles d'alcool et de tabac. Les questions sont de type fermé avec des contrôles de réponse. Le questionnaire laisse néanmoins la possibilité aux participants de ne pas répondre aux questions sur le revenu.

À partir du revenu du ménage, nous appliquons les coefficients d'unité de consommation de l'INSEE pour déterminer le revenu par unité de consommation. Il est compté une unité pour le premier adulte, 0.5 unité pour chaque personne supplémentaire âgée de plus de 14 ans et 0.3 unité pour les autres. Une bonne concordance entre les données recueillies par ce questionnaire et celles obtenues avec un questionnaire papier a été observée (158)

L'*international Physical Activity Questionnaire* (IPAQ) est proposé aux participants afin d'évaluer la durée de l'activité physique quotidienne des participants (159). Les données recueillies par ce questionnaire permettent d'estimer le temps de marche, d'activité physique modérée et intense ainsi que le nombre d'heures assis par semaine. En considérant les équivalents métaboliques (MET)

de chacune des activités, nous estimons le niveau d'activité physique des personnes selon trois modalités : moins d'une demi-heure par jour ou équivalent, entre une demi-heure ou équivalent et une heure par jour et plus d'une heure par jour ou équivalent. La présence d'une question optionnelle (sur l'évaluation du nombre de pas effectué par jour) dans le questionnaire a empêché le calcul de l'IPAQ pour de nombreux participants, et donc des données manquantes pour cette variable.

3) Évaluation des impacts environnementaux des régimes alimentaires

a/ Description des analyses de cycle de vie des produits bruts grâce à l'outil DIALECTE

Afin d'estimer les impacts environnementaux liés à la production des régimes alimentaires, nous avons utilisé des données d'analyse de cycle de vie (ACV). Cette méthodologie a été normalisée au niveau international par les normes ISO (14040 à 14043). Ces normes définissent les ACV comme un procédé de « compilation et évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie ».

Dans ce travail, les impacts de la production de 60 aliments bruts (n'ayant subi aucune transformation) ont été estimés, en adoptant une approche basée sur les produits, c'est-à-dire en ramenant les impacts au tonnage. Nous décrivons ensuite la méthodologie par étapes.

Première Étape : définition des objectifs et du champ de l'étude

Dans l'idéal, les ACV prennent en considération l'ensemble du cycle de vie d'un produit : de l'extraction des matières premières nécessaires à sa production jusqu'aux traitements de sa fin de vie. Néanmoins, pour des questions de faisabilité, les champs d'études sont souvent plus limités. C'est pourquoi il est nécessaire de définir les frontières du système étudié, les unités fonctionnelles choisies et les objectifs de l'analyse.

Dans le cadre du projet BioNutriNet, l'objectif était de déterminer les impacts sur l'environnement liés à la production des régimes alimentaires observés dans la cohorte en distinguant les aliments issus de l'agriculture biologique et de l'agriculture conventionnelle. Le périmètre d'étude n'a pas pu intégrer l'ensemble du cycle de vie des aliments par l'absence de données disponibles. Ainsi, les processus en amont, comme la production d'intrants ou la fourniture d'énergie, ont pu être inclus dans l'évaluation, mais le conditionnement, le transport, le traitement, le stockage et le recyclage ont été exclus. Ce périmètre plus contraint peut toutefois être relativisé, car pour un grand nombre d'aliments, l'essentiel des impacts environnementaux a lieu lors de la phase de production agricole

(160,161). De plus, les différences entre les modes de production biologiques et conventionnels sont probablement plus fortes au niveau de la production agricole. Ainsi, le périmètre d'étude ne limite que faiblement les comparaisons.

Etape2 : inventaire de cycle de vie

Cette seconde étape du cycle de vie consiste à dresser l'inventaire des flux de matières et d'énergies entrants et sortants, associés au cycle de vie rapporté à l'unité fonctionnelle retenue. Les informations nécessaires sont collectées par l'outil DIALECTE, développé par l'association Solagro. L'objectif principal de cet outil est de réaliser des diagnostics agroenvironnementaux à l'échelle des exploitations agricoles en France et ainsi de proposer des axes d'amélioration pour les exploitants. Depuis sa mise en place, un grand nombre d'informations quantitatives sur les conditions de production agricole a pu être collecté au sein des 2086 fermes ayant eu recours à cet outil. Cet échantillon de fermes présente une grande diversité de production. Il contient en effet des données pour 165 productions végétales et 72 classes d'animaux. De plus, 46% des fermes produisent selon le cahier des charges de l'agriculture biologique, ce qui est essentiel pour répondre à l'objectif de distinction des impacts environnementaux entre modes de production du projet BioNutriNet. A notre connaissance, uniquement la base de données d'Agribalyse® fournissait des données pour quelques aliments en biologique en 2013, mais pas suffisamment pour couvrir l'ensemble des régimes.

Ainsi, l'outil DIALECTE a permis de dresser l'inventaire des consommations de ressources (surface) et d'énergie, ainsi que des émissions de gaz à effet de serre pour la production d'aliments bruts conventionnels et biologiques.

Étape 3 : évaluation des impacts

En théorie, les ACV cherchent à couvrir l'ensemble des impacts environnementaux naturels et anthropiques, la santé humaine et les ressources naturelles. Pour ce qui est du secteur agricole, les principaux impacts concernent le réchauffement climatique, la consommation d'énergie qui est principalement fossile et épuisable, l'occupation des sols, la perte de biodiversité, la consommation d'eau ainsi que les pollutions liées à l'usage de certains intrants et pesticides.

Pour des questions, de temps et de moyens, il n'a pas été possible de considérer l'ensemble des impacts de la production agricole. Néanmoins, nous en avons retenu trois :

- La demande cumulée en énergie, pour rendre partiellement compte de l'épuisement des ressources naturelles.

- Les émissions de gaz à effet de serre responsables des changements climatiques anthropiques.
- L'occupation des terres pour les activités agricoles dans la mesure où elles sont limitées et que les changements d'affectation des sols modifient et détruisent la biodiversité en place.

b/ Description des indicateurs environnementaux obtenus par DIALECTE

Consommation d'énergie primaire

La consommation d'énergie calculée ici correspond à la consommation d'énergie primaire, exprimée en mégajoules. Elle prend en compte les phases de traitement de l'énergie en amont de la consommation sur l'exploitation agricole. La méthode utilisée est celle de la mesure du *Cumulative Energy Demand* (CED) prenant en compte à la fois la consommation d'énergie renouvelable et non renouvelable. Néanmoins, compte tenu de la part très majoritaire des énergies non renouvelables dans notre consommation d'énergie, les valeurs de consommation d'énergie primaire peuvent être comparées à l'indicateur *CED non renewable* retenu dans la base Agribalyse®.

Tableau 1: Postes de consommation d'énergie primaire et mode de calcul par production

Poste de consommation	Données d'enquête	Allocation
<i>Énergies directes hors irrigation</i>		
Carburants (Fuel, lubrifiants, gazole et essence)	Données à l'échelle de l'exploitation agricole	Allocation des consommations au prorata des consommations théoriques des productions végétales et des bâtiments d'élevage
Gaz (propane, butane, gaz naturel)		
Électricité		
<i>Énergies directes pour l'irrigation</i>		
Fuel	Données à l'échelle de l'exploitation agricole	Allocation au prorata de consommations théoriques des cultures, calculées à partir de coefficients de consommations génériques
Électricité		
<i>Énergies indirectes</i>		
Produits d'élevage et vétérinaires	Données à l'échelle de l'exploitation agricole	Consommation non considérée
Mécanisation	Données à l'échelle de l'exploitation agricole	Allocation aux productions végétales, au prorata de leur surface
Bâtiments (<30 ans)		
Bâches plastiques		
Conservateurs ensilage		
Engrais	Données par culture	Non nécessaire
Produits phytosanitaires	Données à l'échelle de l'exploitation agricole	Allocation entre les animaux au prorata de leurs consommations respectives en fourrages et concentrés ou usage de coefficients génériques de la littérature pour les aliments achetés
Aliments pour les animaux		

Le calcul est basé sur l'outil Dia'terre®. Le Tableau 1 présente les postes de consommation considérés. Le recueil des consommations d'énergie est réalisé à l'échelle des exploitations agricoles qui souvent ont plusieurs productions. Des allocations génériques ont été attribuées afin de répartir de manière théorique les consommations énergétiques en fonction des surfaces des cultures et des effectifs du cheptel.

Les émissions de gaz à effet de serre

L'indicateur retenu est le Potentiel de Réchauffement Global (PRG) à l'horizon de 100 ans, exprimé en $\text{kgCO}_{2\text{eq}}$, pour les trois principaux gaz à effet de serre émis lors de la production agricole (dioxyde de carbone CO_2 , méthane CH_4 , et le protoxyde d'azote N_2O). Le PRG_{100} du méthane est de 23 $\text{kg CO}_{2\text{eq}}/\text{kg}$ et celui du N_2O de 296 $\text{kg CO}_{2\text{eq}}/\text{kg}$. Le PRG_{100} est l'indicateur le plus couramment utilisé et recommandé par le GIEC (groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). Néanmoins, il est contesté, car il étale les impacts des gaz sur une période de 100 ans et certains gaz, comme le méthane, ont une durée de vie dans l'atmosphère plus courte (12 ans pour le méthane). L'usage de cet indicateur distribue donc les impacts sur un temps long ce qui minimise les effets sur le court terme et les augmente sur le long terme.

Comme pour les consommations d'énergie primaire, le calcul des émissions reprend la méthode développée dans l'outil Dia'terre®. Le Tableau 2 présente les postes d'émissions et les allocations réalisées pour répartir les émissions mesurées à l'échelle de l'exploitation agricole.

Tableau 2: Postes d'émission de gaz à effet de serre et mode de calcul par production

Poste d'émissions	Données d'enquête	Allocation
<i>Consommation d'énergies directes</i>		
Énergie directe hors irrigation (carburants, gaz, électricité)	Données à l'échelle de l'exploitation agricole	Allocation au prorata des émissions théoriques des cultures et des bâtiments d'élevage
Énergie directe pour l'irrigation (carburants, électricité)	Données à l'échelle de l'exploitation agricole	Allocation au prorata des consommations d'eau des cultures
<i>Énergies indirectes</i>		
Mise à disposition d'intrants (bâtiments < 30 ans, mécanisation, plastique, conservateur d'ensilage, produits vétérinaires)	Données à l'échelle de l'exploitation agricole	Allocation aux cultures, au prorata de leur surface
Mise à disposition d'engrais et de produits phytosanitaires	Données par culture	Non nécessaire
Aliments pour les animaux	Données à l'échelle de l'exploitation agricole	Allocation aux animaux au prorata de leurs consommations en fourrages et concentrés ou usage de coefficients génériques de la littérature pour les aliments achetés
<i>Émissions diffuses</i>		
Fermentation entérique	Données par famille d'animaux	
Émissions directes de N ₂ O (épandage des engrais azotés et effluents d'élevage (y compris par le pâturage), minéralisation des résidus de culture)	Données par culture	Non nécessaire
Émissions indirectes de N ₂ O (par les retombées d'ammoniac volatilisé, le ruissellement et la lixiviation d'azote)		
Stockage de carbone dans les sols		Non pris en compte
Déforestation		Non pris en compte

Occupation des sols

L'occupation des sols correspond aux surfaces nécessaires à la production des produits bruts sans considérer le temps d'usage des sols. Cet indicateur est donc égal à l'inverse du rendement ($m^2.kg^{-1}$). Il n'est alors pas tout à fait égal à l'indicateur d'utilisation des sols qui prend en compte le temps d'occupation. Les deux indicateurs sont comparables uniquement lorsque la période de production est d'un an, ce qui est souvent le cas. La principale exception est le maraîchage, car souvent plusieurs cultures sont effectuées sur une même parcelle la même année. Néanmoins, étant donné que les surfaces nécessaires pour les activités maraîchères sont très petites en comparaison avec celles

nécessaires aux grandes cultures ou l'élevage, prendre en compte cet aspect n'aurait que peu d'influence sur les résultats.

Pour l'élevage, l'occupation des sols correspond à la somme des surfaces pour le pâturage et les surfaces nécessaires à la production d'aliments pour nourrir les animaux, produits sur place ou achetés. Les surfaces des bâtiments d'élevage n'ont pas été considérées.

c/ Traitement des cas particuliers

Cas particulier pour les produits du maraîchage

Pour les 29 produits bruts du maraîchage, les surfaces de production sont très petites et l'extrapolation des données recueillies sur ces petites surfaces est hasardeuse. Par conséquent, une méthodologie différente a été appliquée. Elle consiste à calculer les impacts à l'hectare, puis à ramener les impacts au kg de produits en prenant la moyenne des rendements des années 2010 à 2015, provenant de la statistique agricole annuelle française. Comme la statistique agricole annuelle française fournit des données uniquement pour les productions en agriculture conventionnelle, des coefficients de rabattements de 14% pour les salades, 41% pour les fraises et 23% pour les autres légumes ont été appliqués pour les productions biologiques (162).

On a considéré que les concombres et tomates (cerises et fraîches) conventionnels sont cultivés sous serres chauffées. Les impacts de la production de tomates et concombres biologiques, aubergines, poivrons, mâche et fraises sont mesurés à partir des valeurs d'impacts des tomates biologiques et conventionnelles cultivées sous abri froid, évalués dans Agribalyse®. Enfin, pour les autres légumes, ce sont les impacts pour les cultures en plein champ qui ont été retenus.

Agrégation de certains produits bruts

Certains produits bruts nécessaires à notre travail correspondent à plusieurs produits dans DIALECTE. Par exemple l'item olive a deux valeurs dans DIALECTE, une pour les olives noires et l'autre pour les olives vertes. Dans ce cas, nous avons utilisé des coefficients de pondération provenant de la statistique agricole française compris entre 2010 et 2015, présentés dans le Tableau 3.

Tableau 3: Agrégation de productions en produit agricole

Produit agricole	Production DIALECTE	Proportion
Olive	Olives noires	0,5
	Olives vertes	0,5
Poulet	Poulet de chair	0,88
	Poulet label	0,12

Viande bovine	Viandes de production allaitante	0,66
	Viandes de réforme	0,34
Viande ovine	Viandes de production allaitante	0,9
	Viandes de réforme	0,1

d/ Distribution des indicateurs et traitement des valeurs manquantes

La méthodologie décrite au-dessus nous a permis d'obtenir des valeurs d'impacts environnementaux pour 60 produits bruts à partir des données recueillies dans DIALECTE. Le nombre de données disponibles pour chaque production est très variable. Il varie de 2 (pour le canard) à 355 (pour la viande de bœuf) avec un l'intervalle interquartile compris entre 34 et 348 pour les productions biologiques. Alors que pour les productions conventionnelles, le nombre varie de 1 (pour les noix) à 408 (pour le blé tendre) avec un intervalle interquartile compris entre 40 et 348. La valeur retenue pour chacun des 60 produits bruts est la médiane. En effet, par rapport à la moyenne la médiane n'est pas sensible aux valeurs extrêmes.

Les données ainsi obtenues pour les aliments conventionnels ont été comparées avec celles de la littérature. Si les résultats étaient très éloignés et que les experts avaient un doute sur la représentativité des fermes contribuant aux résultats, nous avons préféré conserver la donnée de la littérature. La démarche de validation n'a pas été publiée néanmoins toutes les données utilisées dans ce travail sur les produits bruts sont publiées dans un matériel supplémentaire accompagnant un article (163). De plus, lorsque c'était possible, la base de données a été complétée par des valeurs provenant de la littérature ou de la base de données Agribalyse®, en particulier pour les fruits de mer (N=6), le miel (N=1), les aliments tropicaux et importés (N=12) et pour 13 autres aliments pour lesquels la base DIALECTE était insuffisante. Finalement, nous avons obtenu une base de données comportant les impacts environnementaux (représentés par les 3 indicateurs) de 92 produits bruts biologiques et conventionnels.

e/ Passage des aliments bruts aux items du questionnaire

Conversion des 264 items du questionnaire de consommation alimentaire en ingrédients simples

Deux étapes de décomposition ont été appliquées pour obtenir des ingrédients (éléments constitués d'un seul élément) à partir des items du questionnaire.

Une grande partie du questionnaire alimentaire est composée d'items génériques. Par exemple, l'item « pâte » contient plusieurs sous-items : vermicelles, pâtes, nouilles chinoises, pâtes à l'œuf, pâtes fraîches et pâtes aux épinards. Afin de déterminer les contributions de chacun des sous-items

dans l'item, nous avons utilisé les fréquences sexe spécifiques de consommation de chacun des sous-items des rappels de 24 heures complétés par les participants de l'étude NutriNet-Santé.

Dans un second temps, les sous-items sont décomposés en ingrédients en fonction des recettes validées par un groupe de nutritionnistes et de diététiciens. Ainsi, les 264 items du questionnaire alimentaire ont été décomposés en 766 ingrédients. Pour des raisons de faisabilité, nous n'avons pas considéré les ingrédients qui ne comptaient jamais pour plus de 5% de la composition globale d'un item. Ainsi, au final nous avons 442 ingrédients.

Conversion des aliments bruts en ingrédients

Certains ingrédients proviennent de la transformation de plusieurs produits bruts, créant ainsi des coproduits qui peuvent avoir une valeur économique. Dans le processus de dé-écrémage du lait, nous récupérons de la crème, qui est par exemple un sous-produit du lait demi-écrémé. Dans ce cas, des allocations économiques ont été appliquées pour répartir les impacts entre ingrédients obtenus par un procédé de transformation d'un même produit brut. Des coefficients de cuisson de Brognard et de préparation provenant de la base de composition des aliments de BioNutriNet sont appliqués pour obtenir les impacts des ingrédients tels que consommer.

Parmi les 442 ingrédients nécessaires, 59 ingrédients, composant plus de 5% d'au moins un item, n'avaient pas de données disponibles. Ces ingrédients manquants sont pour la plupart des aliments importés, certaines boissons alcoolisées, les levures et les graines.

Conversion des ingrédients en items

L'impact environnemental de chacun des items (estimé pour 100g) a été obtenu en sommant pour chacun des ingrédients les constituants, son impact environnemental et sa contribution.

Environ 75% des items ont leur composition couverte à plus de 98,8% par les 442 ingrédients. Lorsqu'un ingrédient est manquant, l'impact environnemental est standardisé pour 100g de l'item. Les items particulièrement concernés par la standardisation sont le poisson, la confiture, les fromages et les sauces.

Au final, les trois indicateurs ont pu être mesurés pour un bon nombre d'items en distinguant les modes de production biologiques et conventionnels. Néanmoins, il nous manque des données pour 22 items concernant l'utilisation d'énergie primaire, 21 items pour les émissions de gaz à effet de

serre et 25 items pour l'occupation des sols. Ces données manquantes concernent en particulier : l'eau, certaines boissons alcoolisées, les fruits et légumes tropicaux, les graines et certaines huiles.

Nous sommes parvenus à mesurer les émissions de gaz à effet de serre émis par la production du régime, le besoin en énergie et la surface nécessaire en combinant les données de la base des impacts environnementaux par quantité d'items et les consommations alimentaires.

f/ Mesure d'un score générique des impacts environnementaux du régime

Pour certaines analyses, nous avons utilisé un score global des impacts environnementaux développés par une équipe néerlandaise. Ce score est dérivé de la méthode du ReCiPe qui permet d'évaluer à la fois les pressions et les impacts environnementaux des produits par des analyses de cycle de vie (164). Les indicateurs utilisés pour les analyses de cycle de vie peuvent être distingués en fonction de leur niveau d'intervention. Pour le changement climatique par exemple, il est possible de distinguer les indicateurs intervenant dans le mécanisme (les quantités de gaz à effet de serre émises), des indicateurs d'impact répartis selon deux niveaux : le pouvoir de réchauffement (midpoint) et les effets de ce réchauffement sur la santé par exemple (endpoint). Dans la version de 2008, le ReCiPe contenait 18 indicateurs d'impacts midpoint et trois indicateurs d'impact de endpoint. Le score aligne les 18 indicateurs midpoints sur les 3 indicateurs endpoints que sont : les dommages pour la santé humaine, la diversité des écosystèmes et la disponibilité des ressources. Des coefficients standardisés et normalisés permettent de faire la liaison entre indicateurs de niveau 1 et 2 et ainsi former un score global unique en additionnant pour les 18 indicateurs le produit des impacts des indicateurs de niveau 1 et leur coefficient. L'ensemble du processus détaillé aboutissant au score est décrit dans le document de présentation du ReCiPe (164).

En pratique, pour les productions agricoles des études ont montré que les trois indicateurs suivants (les émissions de gaz à effet de serre, la demande en énergie et l'utilisation des terres) contribuaient à environ 90% des impacts (165). Ainsi, un score de ReCiPe partiel (le pReCiPe) a été proposé afin de ne considérer que ces trois indicateurs pour les analyses des produits alimentaires ou des régimes (113). La formule de ce score est décrite en dessous :

$$\text{pReCiPe} = 0.0459 * \text{émissions de gaz à effet de serre (en kg}_{\text{CO}_2\text{eq}}/\text{kg}) + 0.0025 * \text{demande en énergie (en MJ/kg)} + 0.0439 * \text{occupation des terres (en m}^2/\text{kg)}$$

4) Évaluation du coût monétaire des régimes alimentaires

a/ Recueil des prix et construction d'une base de données

Nous avons utilisé les données de la base des prix KANTAR de 2012 pour les aliments biologiques et conventionnels achetés dans les grandes surfaces et de quelques magasins spécialisés. De plus, des collectes de prix ont été effectuées afin de compléter la base avec des données pour les circuits courts d'approvisionnement par des membres de l'association Bioconsom'acteurs. Ainsi, 1100 prix ont été collectés à l'automne 2014 et 862 au printemps 2015 dans neuf départements de régions françaises différentes (131).

L'ensemble des données de la base Kantar et de la collecte de prix a permis de constituer une base de données avec les prix de chacun des items selon son mode de production biologique ou conventionnel et de son lieu d'achat : à la ferme, auprès d'un artisan, à l'épicerie dans une grande ou moyenne surface, dans un hard discount, dans un magasin ou association de producteurs, paniers ou AMAP (association pour le maintien d'une agriculture paysanne), marché, ou magasin spécialité en aliments biologiques.

b/ Mesure du coût monétaire du régime et du budget alloué à l'alimentation

La base de données ainsi construite nous a permis d'évaluer le prix du régime des participants. Pour cela, nous avons recueilli pour 31 groupes d'aliments, au maximum deux lieux privilégiés d'approvisionnement (commerce et autoproduction). Si uniquement un lieu d'achat était fourni, nous prenons le prix de l'item dans ce lieu d'achat. Alors que si deux lieux d'achat étaient indiqués nous avons pris la moyenne des prix dans ces deux lieux. Enfin, lorsque le participant n'avait pas répondu à la question pour un groupe d'achat, nous avons considéré les prix du lieu d'achat le plus fréquenté pour les autres groupes d'aliments. Ces données de prix et de lieux d'achat privilégiés avec les données de consommation moyenne par item nous ont permis d'estimer un prix journalier pour chacun des régimes des participants.

Nous avons également estimé de manière approximative la part du budget des participants allouée à l'alimentation. Le revenu par unité de consommation de chaque participant était disponible, par intervalle. Nous avons donc considéré que le revenu était égal à la médiane de l'intervalle et pour les valeurs extrêmes, nous avons considéré le revenu médian du premier et dernier décile de revenu des Français (source : INSEE). Ainsi, nous avons considéré que les participants déclarant moins de 900€/mois avaient un revenu de 765€/mois (moyenne du premier décile de revenu par unité de consommation en France) et ceux déclarant plus de 3700€/mois avaient un revenu de 5480€/mois

(moyenne du dernier décile de revenu par unité de consommation en France). En divisant ce revenu approximatif par le prix moyen par mois du régime, nous obtenons une estimation de la part du budget allouée à l'alimentation de chacun des participants.

5) Échantillon d'étude

a/ Sélection de l'échantillon

Notre population est composée des participants de l'étude NutriNet-Santé qui ont répondu au questionnaire alimentaire sur le bio (FFQ bio) en 2014. En fin de campagne du questionnaire, nous avons 37685 réponses. Néanmoins, tous les questionnaires n'ont pas pu être utilisés. Les données sociodémographiques ou de modes de vies importantes à considérer pour les ajustements étaient manquantes pour certains participants (N=380). Un calcul de cohérence a permis de détecter des questionnaires mal complétés (n=1010). Pour chacun des participants, nous avons mesuré les apports énergétiques nécessaires prenant en compte l'activité physique et les besoins métaboliques de base par les équations de Schofield (166). Ce calcul nous a permis de mesurer le ratio des apports énergétiques déclarés sur les besoins énergétiques. Les participants pour qui ce ratio était en dessous de 0,35 ou au-dessus de 1,93 ont été considérés comme sous-déclarant ou sur-déclarants (N=1099). Ces seuils avaient été fixés précédemment sur le questionnaire de fréquence déjà utilisé dans la cohorte et correspondent aux premiers et derniers centiles de la distribution de l'échantillon de l'étude de validation. Enfin, nous avons également exclu de notre échantillon les quelques participants n'habitant pas en France (N=743). L'échantillon était alors composé de 34 442 participants.

Pour certaines analyses, nous avons dû exclure de cet échantillon, les participants qui n'ont pas répondu au second questionnaire du projet BioNutriNet sur les comportements vis-à-vis de l'agriculture biologique ou des pratiques alimentaires durables. Les données collectées par ce questionnaire étaient utiles pour évaluer en particulier le prix des régimes alimentaires (par les questions sur les lieux d'achat privilégié) et les pratiques alimentaires. Dans ce cas, notre échantillon d'étude était composé de 29 388 participants.

b/ Redressement

Pour certains travaux, nous avons été amenés à redresser notre échantillon sur les caractéristiques de la population française (recensement de 2009 de l'INSEE). Dans ce cas, nous devons prendre uniquement en compte les participants vivant en France métropolitaine (N=34 193). Nous avons utilisé la macro Calmar de l'INSEE (Institut national de la statistique et des études économiques) pour

réaliser le redressement. Cette macro permet de réaliser un redressement sur la distribution de la population française en attribuant des pondérations distinctes chez les hommes et les femmes et en utilisant les variables de calage suivantes : l'âge, la présence d'enfant, la zone d'étude et d'aménagement du territoire du domicile et la catégorie socioprofessionnelle.

c/ Imputations multiples

Étant donnée la présence d'une question optionnelle dans le questionnaire de mesure de l'IPAQ (activité physique), les données manquantes pour cette variable étaient nombreuses. Dans certaines études afin d'éviter de supprimer les individus pour qui l'IPAQ était manquant ou bien considérer une modalité « manquant » pour ces personnes, nous avons eu recours à l'imputation multiple.

L'imputation multiple est une méthode qui vise à représenter un échantillon aléatoire des valeurs manquantes, pour refléter l'incertitude autour des données manquantes. Ainsi, son objectif est de correctement reproduire la matrice de variance/covariance qui aurait été observée si les données n'avaient pas d'information manquante. Nous pouvons distinguer 3 phases distinctes à l'imputation multiple :

- Les données manquantes sont complétées n fois afin de générer n jeux de données complets. Sur SAS®, cette phase se réalise par l'usage de la procédure `proc mi`®. Plusieurs méthodes existent pour l'imputation, le choix dépend du pattern des données manquantes et de la distribution des variables.
- Les analyses sont réalisées sur les n jeux de données en ajoutant l'option « `by _imputation` ».
- Les résultats des n analyses de jeux de données complets sont combinés avec la procédure `proc mianalyze`® sur SAS®.

Généralement, 5 imputations sont préconisées, ici nous en avons réalisé 10.

6) Méthodes statistiques et outils mathématiques

Dans cette dernière partie, nous présenterons les principaux modèles statistiques et outils mathématiques utilisés au cours de cette thèse. Nous fournissons les éléments nécessaires à leur compréhension et à leur interprétation.

a/ Analyse de covariable (ANCOVA)

L'ANCOVA ou analyse de la covariance est un modèle linéaire permettant de relier une variable réponse (Y) quantitative et continue à des variables explicatives (X_i) quantitatives ou qualitatives.

L'ANCOVA permet de tester si certains facteurs ont un effet sur la variable réponse après avoir enlevé la variance due aux covariables (ou variables d'ajustements). Les hypothèses pour utiliser ce modèle sont que :

- Les observations sont indépendantes.
- La variable réponse Y suit une distribution Gaussienne.
- Les résidus suivent une loi normale centrée et de mêmes variances.
- Il existe un lien linéaire entre la variable réponse et chaque variable explicative.

Dans cette thèse, nous appliquons très souvent des ANCOVA afin de comparer des moyennes de différents groupes, en utilisant la procédure proc glm® de SAS®.

Dans le cas de comparaison de moyennes de consommation de groupes d'aliments ou de nutriments, nous appliquons en plus un ajustement sur l'apport énergétique en appliquant la méthode des résidus (155). L'usage de cette méthode permet d'estimer l'apport en nutriment indépendamment de l'apport calorique du régime. En pratique, cette approche consiste à utiliser les apports en nutriments corrigés de ceux attendus selon l'apport calorique calculé, comme les résidus du modèle de régression entre l'apport énergétique et l'apport en nutriment (ou aliment).

b/ La régression des rangs réduits

La régression des rangs réduits (ou RRR) est une méthode exploratoire permettant d'obtenir des fonctions linéaires de variables de prédiction maximisant l'explication de la variation des variables réponses. Cette méthode a été utilisée pour la première fois en épidémiologie de la nutrition par Hoffmann (167). La méthode RRR est assez proche de l'analyse en composante principale (ACP). Elle se distingue, car les fonctions linéaires de groupes d'aliments (les variables de prédiction) obtenus expliquent au mieux les variations de variables explicatives (par exemple des nutriments, ou des indicateurs de durabilité). L'intérêt de cette méthode est d'orienter l'exploration pour répondre à une question de recherche spécifique.

Tout comme l'ACP, les vecteurs de coefficients des fonctions linéaires extraites sont des vecteurs propres d'une matrice de covariance. L'ACP utilise la matrice de covariance des prédicteurs, tandis que la RRR part de la matrice de covariance des variables réponses. Les facteurs obtenus sont extraits par valeurs propres décroissantes. Ainsi, le premier facteur de la RRR explique le plus de variation des variables réponses par rapport à toutes les autres fonctions linéaires des prédicteurs, mais n'explique qu'une fraction de cette variation. Les facteurs extraits sont non corrélés.

Une régression des rangs réduits a été réalisée dans le cadre de la thèse, avec le logiciel de statistiques SAS®, en utilisant la procédure proc pls®.

Le choix du nombre de facteurs extraits à conserver est orienté par la distribution des valeurs propres de chacun. Le nombre retenu est orienté par un décrochage des valeurs propres.

c/ La classification

La classification consiste à regrouper des données présentant des similitudes sur les descripteurs quantitatifs tout en séparant au mieux les classes ainsi constituées. L'objectif étant que les classes ainsi formées présentent des similitudes sur les descripteurs utilisés.

La méthode de classification que nous avons mise en place lors de cette thèse se déroule en deux étapes. La première consiste à réaliser une classification ascendante hiérarchique en utilisant la méthode de Ward :

- On commence avec une partition à n classes (n étant le nombre d'individus), ainsi chaque individu est une classe.
- On propose une partition à $n-1$ classes en réunissant 2 individus, les plus proches sur les descripteurs quantitatifs choisis, c'est-à-dire minimisant la variation d'inertie intra-classe. On utilise alors le centre de gravité entre les deux individus pour définir la localisation de la nouvelle classe.
- Nous reproduisons le processus, jusqu'à obtenir une seule classe.

Sur SAS®, nous utilisons la procédure proc cluster® pour réaliser cette première étape.

Afin de déterminer le nombre de classes à conserver, le tracé d'un dendrogramme obtenu par la procédure proc tree® de SAS® qui est une représentation graphique sous forme d'arbre binaire d'agrégations successives jusqu'à la réunion en une seule classe de tous individus, peut nous guider. La hauteur d'une branche étant proportionnelle à la distance entre les deux objets regroupés, nous choisissons le nombre de classes lorsque les branches sont encore assez grandes. D'autres critères de choix peuvent également nous orienter dans le choix du nombre de classes à conserver : le semi-partial R-squared, le pseudo t-squared ou le pseudo t^2 .

La seconde étape permet de consolider le classement obtenu lors de la première étape. Pour cela, nous utilisons la méthode des K-means : méthode des centres mobiles basée sur les barycentres initiaux des clusters obtenus précédemment. Cette méthode répartit les n individus en K ensembles

(K ayant été déterminé par l'étude du dendogramme) en minimisant la distance entre les points à l'intérieur de chaque partition (ici barycentres). C'est la procédure proc fastclus® qui nous permet de réaliser cette étape sur SAS®.

d/ Modèle de Cox

Le modèle de Cox est un modèle de régression adapté aux variables à expliquer censurées, comme la survie ou bien la survenue d'une maladie (168). Ce modèle permet ainsi de relier un événement de santé à une liste de variables explicatives, en estimant le poids spécifique de chacune d'entre-elles. Par l'usage de ce modèle, nous faisons l'hypothèse que le risque instantané d'un événement de santé pour un participant caractérisé par un ensemble de p variables explicatives Z_1, \dots, Z_p peut s'écrire de la manière suivante :

$$H(t) = H_0(t) \cdot \exp(a_1 Z_1 + \dots + a_p Z_p)$$

$H_0(t)$ est une fonction ne dépendant que du temps et a_1, \dots, a_p sont des constantes.

Afin d'appliquer ce modèle, il est important de vérifier les deux hypothèses suivantes :

- L'hypothèse des risques proportionnels : le rapport de risques instantanés de décès ou de maladie de deux sujets est indépendant du temps.
- L'hypothèse de loglinéarité : le logarithme de $H(t)$ est une fonction linéaire des Z_i

Ainsi, l'usage de ce modèle permet de définir si l'événement est spécifiquement lié à une variable Z_i , en prenant compte des effets des autres Z_j . Les variables Z_i peuvent être continues ou en classe. En pratique, le modèle nous fournit des rapports de risques (ou HR) et leur intervalle de confiance pour chacune des variables explicatives. Si l'intervalle de confiance contient 1, alors on dit que la variable explicative n'a pas d'effet significatif sur le risque de survenue d'un événement de santé. Si le HR est inférieur à 1 est que l'intervalle de confiance ne contient pas 1, alors le risque est diminué de 1-HR% et si le HR est supérieur à 1 le risque est augmenté d'HR fois.

L'hypothèse des risques proportionnels se vérifie de plusieurs façons. Une des manières est de tracer les résidus de Schoenfeld en fonction du temps. Une droite proche de l'origine signifie, que les résidus sont totalement aléatoires et l'hypothèse est vérifiée. Nous pouvons également tracer les courbes pour différentes expositions du log-log de la probabilité de survie au cours du temps pour plusieurs groupes d'individus et vérifier qu'elles sont un peu près parallèles.

Nous pouvons évaluer les écarts à la log-linéarité en traçant les HR pour les quartiles des variables continues afin de vérifier s'il était possible de tracer une droite. Si une droite peut être tracée, l'hypothèse de log-linéarité est vérifiée.

Lors de la construction des modèles, nous avons pris l'âge comme échelle de temps (âge au début et à la fin du suivi), plutôt que le temps de suivi.

Ce modèle a mis en œuvre plusieurs fois dans la thèse en utilisant le logiciel SAS® et la procédure proc phreg®.

L'usage de la méthode de Chiueve (169) permet de comparer formellement la force de prédiction de différentes expositions, évaluer par différents scores, et les risques pour la santé. Cette méthode consiste à introduire dans le même modèle les deux scores à comparer, puis à mesurer la statistique de Wald, nous permettant après un test du χ^2 . La statistique de Wald est calculée en utilisant la formule suivante :

$\chi^2 = [(\beta_1 - \beta_2) / \text{racine carrée} ((\text{var}(\beta_1 - \beta_2)))]^2$ où β_1 est le coefficient β du premier score, β_2 le coefficient β du second score et $\text{var}(\beta_1 - \beta_2) = \text{var}(\beta_1) + \text{var}(\beta_2) - 2 \text{cov}(\beta_1, \beta_2)$.

e/ Les modèles mixtes

Les modèles mixtes sont des modèles statistiques spécialement conçus pour intégrer des facteurs à effets fixes (c'est-à-dire dont les modalités ne changent pas quand l'expérience considérée est réalisée à plusieurs reprises) et des facteurs à effet aléatoires. Des informations complètes sur le modèle peuvent être retrouvées dans cette référence (170).

Si notre objectif est d'étudier l'effet de 3 niveaux distincts d'exposition sur l'évolution de l'indice de masse corporelle au cours du temps, nous prenons le premier niveau d'exposition en référence. On construit les indicatrices pour les deux autres expositions (X_{2i} et X_{3i}). Le modèle peut alors s'écrire de la manière suivante :

$$Y_{i,j} = \beta_0 + \beta_1 t_{ij} + \beta_2 X_{2i} + \beta_3 X_{3i} + \beta_4 X_{2i} t_{ij} + \beta_5 X_{3i} t_{ij} + b_{0i} + b_{1i} t_{ij} + \epsilon_{ij}$$

$Y_{i,j}$ correspond à la mesure répétée j de l'indice de masse corporelle chez le sujet i et t_{ij} le temps entre le début du suivi et la mesure j .

La signification des β du modèle pour une modélisation de l'IMC est présentée dans la Tableau 4.

Les effets aléatoires b_0 et b_{1i} sont des vecteurs d'effets aléatoires distribués identiquement et indépendamment suivant une loi normale de moyenne nulle et de variance inconnue à estimer. Enfin ε_{ij} correspond aux erreurs, et suit une loi normale de moyenne nulle.

Ces paramètres peuvent être estimés en utilisant la procédure `proc mixed`[®] de SAS[®]. Des tests de Wald multivariés ou de rapport de vraisemblance avec comme hypothèse $H_0 : \beta_2 = \beta_3 = 0$ sont utilisés pour déterminer s'il y a des différences de moyenne d'IMC à l'inclusion entre les expositions, et de même avec les β_4 et β_5 pour identifier des différences d'évolution d'IMC au cours du temps.

Tableau 4: Interprétation des β des équations d'un modèle mixte

Nom	Beta	Signification
Ordonnée à l'origine	β_0	La valeur moyenne de l'IMC à l'inclusion dans le groupe de référence.
Temps	β_1	L'évolution moyenne de l'IMC par unité de temps pour le groupe de référence.
Exposition 2	β_2	La différence moyenne d'IMC à l'inclusion entre le groupe de référence et le groupe d'exposition 2.
Exposition 3	β_3	La différence moyenne d'IMC à l'inclusion entre le groupe de référence et le groupe d'exposition 3.
Exposition 2 X temps	β_4	La différence moyenne de pente d'IMC par unité de temps entre l'exposition 1 et 2.
Exposition 3 X temps	β_5	La différence moyenne de pente d'IMC par unité de temps entre l'exposition 1 et 3.

f/ L'optimisation

L'optimisation appliquée aux régimes alimentaires est une technique permettant de concevoir des solutions qui respectent un ensemble de contraintes tout en optimisant une fonction objectif. La technique de résolution des problèmes d'optimisation s'appuie sur l'algorithme du Simplex développé initialement par Dantzig dans le cas de résolution de problèmes linéaires en nutrition (171). Cette technique a ensuite été étendue pour résoudre des problèmes non linéaires (quadratiques ou autres). On dit que le problème est non linéaire, si une fonction objectif ou une contrainte n'est pas linéaire. Aujourd'hui l'optimisation est utilisée pour répondre à une grande variété de questions en nutrition, comme la conception de ration pour les soldats, la définition de repères alimentaires ou encore l'étude des tensions entre différentes dimensions de l'alimentation durable.

Dans certaines situations, il est possible d'avoir plusieurs fonctions objectifs à résoudre dans un même problème. La superposition de ces fonctions dans une fonction objectif pose certaines difficultés. En effet, les valeurs que peuvent prendre les composantes sont parfois sur des échelles différentes et la solution apportée peut, dans certains cas, répondre uniquement à une partie des composantes.

Helmut Mausser propose ainsi deux techniques permettant de contrôler les poids de chacun des éléments de l'objectif (172) :

- La pondération de chacune des composantes pour les contenir dans un intervalle comparable.
- La hiérarchisation des composantes, dans ce cas, les composantes sont classées par ordre décroissant d'importance. Puis, nous optimisons individuellement chacune des fonctions en commençant par les fonctions linéaires et par ordre d'importance, en ajoutant à chaque fois une contrainte pour ne pas excéder un pourcentage de dégradation de la valeur obtenue dans l'optimisation de la composante précédente.

Il est possible d'utiliser la procédure `proc optmodel`[®] de SAS[®] afin de résoudre des problèmes d'optimisations linéaires ou non.

IV- Identification et caractérisation de comportements alimentaires plus durables au sein de la cohorte NutriNet Santé

1) Contexte et objectifs

Ces dernières années, de nombreuses études ont cherché à identifier des comportements alimentaires plus durables (126,129,136,141,173,174), c'est-à-dire des régimes capables de répondre aux challenges nutritionnels, climatiques, environnementaux et sociaux. L'état de l'art a mis en avant quelques points faibles pour lesquels des recherches supplémentaires seraient nécessaires. En particulier, il semble que la diversité des indicateurs sélectionnés dans les précédentes études soit assez réduite (136), limitant l'approche systémique de l'évaluation de la durabilité de l'alimentation. De plus, les méthodes de production, tout comme les comportements d'achats sont peu souvent considérés dans l'évaluation de la durabilité des comportements alimentaires, bien qu'ils puissent avoir un rôle à jouer.

Notre objectif était d'évaluer et de classer les participants de la cohorte NutriNet-Santé selon la durabilité de leur comportement alimentaire en utilisant trois approches différentes. Ainsi, nous avons :

- Étudié la durabilité des régimes alimentaires selon la contribution aux changements climatiques (niveau d'émissions de gaz à effet de serre) de leur production.
- Identifié des clusters par une approche exploratoire prenant en compte plusieurs paramètres de la durabilité des régimes alimentaires.
- Évalué la durabilité des comportements alimentaires avec un score construit *a priori* pour estimer la durabilité des régimes alimentaires. La validité de ce score a été également évaluée sur notre échantillon.

Nous discuterons ensuite les résultats obtenus par les différentes approches en comparant la structure des régimes jugés comme plus durables par les trois approches mises en œuvre.

Il est à noter pour la suite que la bibliographie nous permettant d'interpréter nos travaux correspond aux références disponibles au moment où nous avons rédigé les articles relatifs à ces résultats.

2) Approches centrées sur le climat

a/ Population d'étude et méthodes appliquées

Population d'étude

37685 volontaires ont complété le questionnaire FFQ-Bio. Nous avons exclu 2109 participants considérés comme sous-déclarants, sur-déclarants ou mauvais déclarants, 391 participants pour qui nous avons des données manquantes, 743 qui ne vivaient pas en France et 249 qui vivaient dans les départements d'outre-mer. L'échantillon d'étude comporte ainsi 34193 volontaires. Par la suite, nous avons redressé l'échantillon des 34193 volontaires avec les données sociodémographiques de la population française vivant en métropole en 2009 de l'INSEE.

Méthodes statistiques

L'échantillon a été divisé en quintiles pondérés, en fonction de la contribution aux changements climatiques (émissions de gaz à effet) de la production de leur régime alimentaire.

Afin de comparer les caractéristiques sociodémographiques et de mode de vie des participants des régimes alimentaires par quintiles d'émissions de gaz à effet de serre, nous avons mesuré des pourcentages et moyennes avec écarts-types. Des tests de tendances de Mantel-Haenszel et du χ^2 ont été réalisés afin de tester la significativité des différences.

Nous avons également estimé les quantités consommées des différents groupes d'aliments en ajustant sur le sexe, l'âge et l'apport énergétique du régime par l'usage de la méthode des résidus (155). Les moyennes sont accompagnées par leur intervalle de confiance à 95%. La contribution des différents groupes alimentaires aux émissions de gaz à effet de serre a pu aussi être évaluée.

Finalement, des analyses de covariance (ANCOVA) nous ont permis d'évaluer de potentielles associations entre les émissions de gaz à effet de serre des régimes et d'autres indicateurs environnementaux (occupation des terres et demande en énergie), nutritionnels (apports énergétiques, indicateurs de la qualité nutritionnelle des régimes, densité énergétique), l'indice de masse corporelle et le prix moyen des régimes. Les variables quantitatives dont la distribution n'était pas normale (dépenses, occupation des terres et demande en énergie) ont été log-transformées avant de réaliser les ANCOVA. Les différences ont été testées statistiquement en utilisant les corrections de tests multiples de Dunnett. Enfin, dans les tableaux, nous avons reporté les P-valeurs de tendance grâce à l'utilisation de tests de contrastes linéaires.

Pour l'ensemble des analyses, nous avons utilisé le logiciel de statistique SAS® 9.4 et l'erreur de type I a été fixée à 5%.

b/ Résultats

Caractéristiques des participants

L'échantillon est composé avant le redressement de 34193 volontaires, dont 75,5% de femmes. L'âge moyen est de 53,3 ans (Écart-type : 14,0).

Le Tableau 5 présente les caractéristiques sociodémographiques et de mode de vie des participants par quintiles d'émissions de gaz à effet de serre dû à la production des régimes. Nous observons que les participants du premier quintile (regroupant les personnes ayant un régime à faibles émissions de gaz à effet de serre) sont plus souvent des femmes, des jeunes, des personnes vivant dans les grandes villes, actives physiquement, non-fumeurs, et diplômées. Nous remarquons également l'absence d'association entre les quintiles et le revenu par unité de consommation. Enfin, la contribution des aliments biologiques dans les régimes à faibles émissions de gaz à effet de serre est plus importante.

Structure des régimes par quintile

Nous observons dans le Tableau 6 une très nette différence de consommation de viandes rouges entre quintiles. En effet, la consommation de viandes rouges est positivement associée au quintile dont les régimes avaient les plus fortes émissions de gaz à effet de serre. Nous observons également une association positive pour les groupes d'aliments suivants : la viande blanche, les aliments composés et les produits laitiers. La consommation d'aliments gras et sucrés ou salés n'est pas significativement différente entre quintiles. Enfin, les participants dans le premier quintile présentent des consommations plus élevées de féculents et d'aliments complets, fruits et légumes et aliments à base de soja.

Tableau 5: Caractéristiques sociodémographiques et de mode de vie par quintile d'émissions de gaz à effet de serre des régimes dans un échantillon redressé de la cohorte NutriNet-Santé, 2014 (N=34193)¹

	Total	Q1 (347-816 kgCO _{2eq} /an)	Q2 (891-1190 kgCO _{2eq} /an)	Q3 (1229-1589 kgCO _{2eq} /an)	Q4 (1639-2158 kgCO _{2eq} /an)	Q5 (,318-4099 kgCO _{2eq} /an)	P- tendance ²
Distribution	N= 34193	N=7837	N=7919	N=7238	N=6190	N=5009	
Homme (%)	47,64	34,23	36,08	47,75	54,26	65,83	<0.0001
Âge (Moyenne (EC))	48,14 (16,25)	45,43 (16,03)	48,39 (15,27)	49,91 (15,06)	48,25 (17,05)	48,74 (18,15)	<0.0001
Type d'agglomération							<0.0001
Milieu rural	25,05	22,33	25,45	27,17	23,97	26,34	
Unité urbaine avec moins de 20 000 habitants	15,81	14,57	13,34	16,53	16,21	18,42	
Unité urbaine avec une population comprise entre 20 000-200 000 habitants	16,85	16,66	19,90	12,86	19,08	15,76	
Unité urbaine de plus de 200 000 habitants	42,29	46,45	41,31	43,44	40,75	39,48	
Activité physique							<0.0001
<30min/j	21,08	20,57	22,88	16,96	22,81	22,23	
30-60 min/j	30,63	30,19	32,78	34,47	29,00	26,71	
>60 min/j	33,95	38,82	31,43	35,27	30,47	33,73	
Données manquantes ³	14,34	10,43	12,91	13,30	17,72	17,33	
Consommation de tabac							<0.0001
Fumeurs	9,49	10,41	6,00	11,02	9,46	10,53	
Fumeurs occasionnels	3,2	3,06	3,30	3,02	3,13	3,47	
Anciens fumeurs	39,98	33,42	38,88	41,65	40,95	44,97	
Non-fumeurs	47,34	53,11	51,82	44,31	46,45	41,04	
Qualification scolaire							<0.0001
Inférieur au baccalauréat	24,89	28,02	29,04	25,20	22,97	19,25	
Équivalent au baccalauréat	15,55	18,80	16,06	13,53	13,35	16,01	
Post-baccalauréat	59,56	53,18	54,90	61,26	63,69	64,75	
Revenu par unité de consommation							0.75
Non déclaré	7,75	10,06	7,69	6,22	9,54	5,23	
<1,200 euros	24,44	23,89	23,38	24,36	24,95	25,60	
1,200-1,800 euros	28,66	28,29	27,18	31,37	26,96	29,48	
1,800-2,700 euros	24,18	24,42	25,30	23,84	23,64	23,73	
>2,700 euros	14,97	13,34	16,45	14,21	14,91	15,96	
Ratio de contribution des aliments biologiques dans le régime⁴	0,26 (0,27)	0,42 (0,32)	0,28 (0,25)	0,21 (0,22)	0,19 (0,22)	0,19 (0,25)	<0.0001

Abréviations : Q, quintile pondéré

¹ Les valeurs présentées sont des pourcentages ou des moyennes avec écarts-types

² P values proviennent de tests de contraste linéaire ou des tests du χ^2 de Mantel-Haenszel

³ Une question du questionnaire étant optionnelle, il existe des valeurs manquantes

⁴ Le ratio de contribution des aliments biologiques dans le régime est obtenu en divisant le total des aliments biologiques ingérés (en g/j) par le total des aliments sans eau (en g/j)

Tableau 6: Quantités moyennes consommées par quintile d'émissions de gaz à effet de serre des régimes d'un échantillon redressé de volontaires de la cohorte NutriNet-Santé, 2014 (N=34193)¹

Distribution	Q1 (347-816 kgCO _{2eq} /an) N=7837	Q2 (891-1190 kgCO _{2eq} /an) N=7919	Q3 (1,229-1589 kgCO _{2eq} /an) N=7238	Q4 (1639-2158 kgCO _{2eq} /an) N=6190	Q5 (2318-4099 kgCO _{2eq} /an) N=5009	P tendance ²
Poisson ³ (g/j)	36,6 (35,5-37,7)	41,8 (40,7-42,9)	52,6 (51,6-53,6)	48,1 (47-49,2)	48,5 (47,3-49,7)	<0.0001
Viande rouge ³ (g/j)	9,9 (9,0-10,7)	25,9 (25,1-26,7)	42,2 (41,4-43)	63 (62,2-63,8)	122,3 (121,4-123,3)	<0.0001
Viande blanche ³ (g/j)	35,3 (33,7-36,9)	59,6 (58-61,1)	82,2 (80,7-83,7)	96,5 (94,9-98)	135,1 (133,3-136,8)	<0.0001
Oeuf ³ (g/j)	11,0 (10,5-11,5)	13,5 (13-13,9)	15,0 (14,6-15,5)	10,4 (10-10,9)	9,7 (9,1-10,2)	<0.0001
Produits laitiers (hors fromages) ³ (g/j)	141 (136-147)	225 (220-230)	257 (252-262)	251 (246-256)	261 (255-267)	<0.0001
Fromages ³ (g/j)	31,3 (30,2-32,4)	40,0 (38,9-41)	46,2 (45,2-47,1)	50,7 (49,6-51,7)	54,0 (52,8-55,2)	<0.0001
Aliments composés ³ (g/j)	37,3 (33,8-40,8)	38,2 (34,8-41,6)	32,1 (28,8-35,4)	30,6 (27,2-34)	55,2 (51,3-59,1)	0.0006
Sauce ³ (g/j)	22,1 (21,6-22,6)	18,2 (17,7-18,6)	16,9 (16,5-17,4)	15,1 (14,7-15,6)	14,0 (13,5-14,5)	<0.0001
Matières grasses ³ (g/j)	33,1 (32,7-33,6)	31,9 (31,4-32,3)	29,8 (29,4-30,2)	27,6 (27,2-28)	22,5 (22-23)	<0.0001
Aliments gras et sucrés ³ (g/j)	71,0 (69,7-72,4)	79,7 (78,4-81,1)	73,0 (71,7-74,3)	73,5 (72,2-74,9)	74,0 (72,4-75,5)	0.95
Féculents raffinés ³ (g/j)	203 (200-206)	189 (186-191)	185 (183-188)	202 (200-205)	166 (162-169)	<0.0001
Produits complets ³ (g/j)	94,8 (92,8-96,8)	72,6 (70,7-74,5)	57,2 (55,3-59)	32,3 (30,4-34,3)	14,8 (12,5-17,0)	<0.0001
Fruits et légumes ³ (g/j)	905 (895-915)	775 (765-784)	726 (716-735)	676 (666-685)	524 (512-535)	<0.0001
Soja ⁴ (g/j)	89,1 (89,5-91,8)	32,1 (29,5-34,7)	25,6 (23,0-28,2)	10,0 (7,4-12,6)	7,3 (4,7-10,0)	<0.0001
Boissons alcoolisées ³ (ml/j)	119 (116-123)	112 (108-115)	110 (106-113)	105 (101-109)	108 (104-113)	<0.0001

Poisson : poissons et fruits de mer, Viande rouge : bœuf, veau et agneau, Viande blanche : porc, volailles et toutes les charcuteries, Produits laitiers : lait, yaourt et desserts lactés, Matières grasses : huile, beurre et autres

Abréviations : Q, quintile redressé

¹ Les valeurs présentées sont des moyennes ajustées (IC95%) mesurées en fonction des marges d'observation

² Les P-valeur proviennent des tests de contrastes linéaires

³ Ajusté sur le sexe, l'âge et l'apport énergétique par la méthode des résidus

⁴ Ajusté sur le sexe et l'âge

La Figure 11 montre d'importantes disparités des contributions relatives des groupes d'aliments aux émissions de gaz à effet de serre de chacun des régimes entre quintiles. En effet, la contribution de la viande rouge est plus forte dans les derniers quintiles alors que ce sont les fruits et légumes et les féculents qui contribuent le plus aux émissions de gaz à effet de serre des régimes des participants du premier quintile.

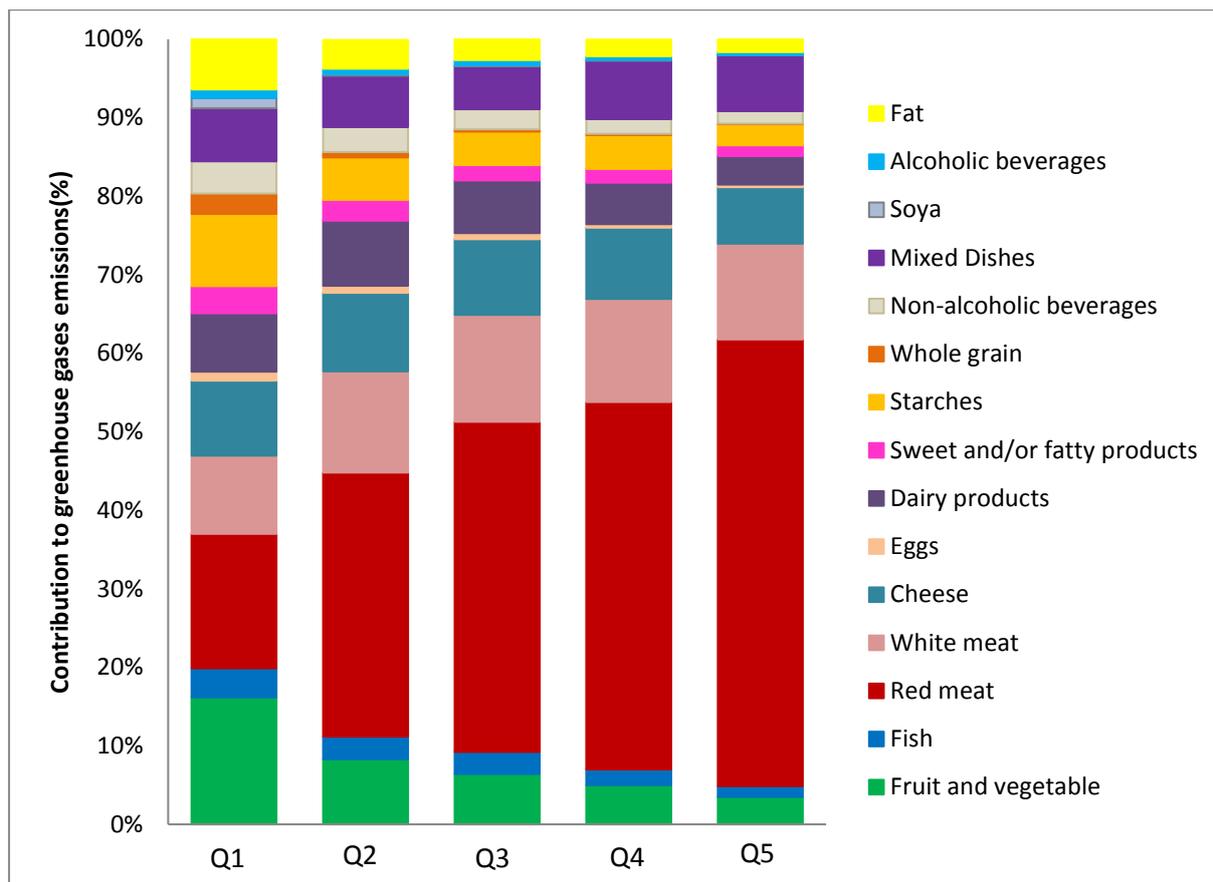


Figure 11 : Contribution relative des groupes d'aliments selon les quintiles d'émissions de gaz à effet de serre des régimes, au sein de la cohorte de volontaires NutriNet-Santé, 2014 (N=34193)

Poisson : poissons et fruits de mer, Viande rouge : bœuf, veau et agneau, Viande blanche : porc, volailles et toutes les charcuteries, Produits laitiers : lait, yaourt et desserts lactés, Matières grasses : huile, beurre et autres
Abréviations : Q, quintile redressé

Caractéristiques nutritionnelles des régimes des participants par quintile

Le Tableau 7 indique que l'apport calorique tout comme la densité énergétique des régimes augmentent linéairement avec les quintiles d'émissions de gaz à effet de serre des régimes. Les participants des quatrième et cinquième quintiles présentent les plus faibles scores de qualité nutritionnelle (PANDiet et mPNNS-GS) alors que la qualité des régimes des participants des trois premiers quintiles est supérieure, mais difficilement distinguable. En effet, les participants du troisième quintile obtiennent le meilleur mPNNS-GS (évaluant le respect avec les recommandations nutritionnelles françaises de 2001, basées sur les groupes d'aliments) alors que ceux du premier quintile obtiennent le meilleur PANDiet (score basé sur les recommandations d'apports en nutriment de 2001). Néanmoins, l'étude des deux sous-scores qui composent le PANDiet, montre que le PANDiet plus élevé des participants du premier quintile s'explique par un bon score de modération (intégrant des nutriments pour lesquels la consommation doit être limitée). Les participants du troisième quintile obtiennent le meilleur score d'adéquation (intégrant les nutriments pour lesquels

un apport minimal est recommandé). Enfin, l'IMC (Indice de Masse Corporelle) des participants est associé positivement avec le niveau d'émissions de gaz à effet de serre des régimes.

Tableau 7: Indicateurs nutritionnels par quintile d'émissions de gaz à effet de serre des régimes d'un échantillon redressé de volontaires de la cohorte NutriNet-Santé, 2014 (N=34193)¹

	Q1 (347-816 kgCO _{2eq} /an)	Q2 (891-1190 kgCO _{2eq} /an)	Q3 (1229-1589 kgCO _{2eq} /an)	Q4 (1639-2158 kgCO _{2eq} /an)	Q5 (2318-4099 kgCO _{2eq} /an)	P tendance ²
Distribution	N=7837	N=7919	N=7238	N=6190	N=5009	
Apport énergétique ³ (kcal/d)	1634 (1620-1649)	1843 (1829-1857)	1998 (1985-2012)	2280 (2266-2293)	2781 (2767-2795)	<0,0001
mPNNS-GS ⁴ (/13.5)	8,39 (8,35-8,43)	8,48 (8,45-8,52)	8,64 (8,61-8,68)	8,28 (8,24-8,32)	7,94 (7,89-7,98)	<0,0001
PANDiet ⁴ (/100)	68,62 (68,45-68,78)	68,04 (67,88-68,2)	66,63 (66,48-66,79)	63,80 (63,64-63,96)	60,70 (60,52-60,88)	<0,0001
- Sous-score d'adéquation ^{4,5} (/100)	70,14 (69,88-70,41)	73,99 (73,74-74,25)	75,92 (75,67-76,17)	74,22 (73,96-74,48)	71,31 (71,01-71,6)	<0,0001
- Sous-score de modération ^{4,5} (/100)	67,09 (66,89-67,3)	62,09 (61,89-62,29)	57,35 (57,15-57,54)	53,37 (53,17-53,57)	50,10 (49,87-50,33)	<0,0001
Densité énergétique ³ (kcal/100g)	72,46 (71,87-73,05)	79,08 (78,49-79,66)	80,52 (79,95-81,09)	86,79 (86,21-87,37)	90,51 (89,93-91,09)	<0,0001
IMC ⁴ (kg/m ²)	23,52 (23,38-23,66)	24,74 (24,6-24,87)	26,01 (25,87-26,14)	25,69 (25,55-25,83)	26,59 (26,43-26,75)	<0,0001

Abréviations : Q : quintile redressé, mPNNS-GS : score modifié (sans paramètre d'activité physique) d'adéquation avec les recommandations du programme national nutrition santé, PANDiet : Score de qualité nutritionnelle basé sur les pourcentages d'adéquation aux recommandations sur les nutriments et IMC : indice de masse corporelle

¹ Les valeurs présentées sont des moyennes ajustées (IC95%) mesurées en fonction des marges d'observation (option OM de SAS®).

² Les P-valeur proviennent des tests de contrastes linéaires

³ Ajusté sur le sexe et l'âge

⁴ Ajusté sur le sexe, l'âge et l'apport énergétique

⁵ Les sous-scores d'adéquation et de modération composent le PANDiet. Le sous-score d'adéquation est la moyenne des probabilités d'adéquation pour 21 nutriments pour lesquels les apports doivent être au-dessus d'une valeur de référence, multiplié par 100. Le sous-score de modération est la moyenne des probabilités d'adéquation pour 6 nutriments pour lesquels les apports ne doivent pas dépasser une certaine valeur avec des pénalités pour des nutriments, multiplié par 100.

Caractéristiques environnementales et économiques des régimes des participants par quintile

Le Tableau 8 présente les indicateurs environnementaux et économiques par quintile d'émissions de gaz à effet de serre. Nous présentons un modèle ajusté sur l'apport énergétique et un modèle sans ajustement. Ainsi, nous constatons que l'occupation des sols, la demande en énergie et le prix des régimes augmentent avec le niveau d'émissions de gaz à effet de serre des régimes. De plus, toutes les associations restent significatives après un ajustement sur l'apport énergétique, bien que l'amplitude des différences soit diminuée.

Tableau 8: Indicateurs environnementaux et de prix par quintile d'émissions de gaz à effet de serre des régimes d'un échantillon redressé de volontaires de la cohorte NutriNet-Santé, 2014 (N=34193)¹

		Q1 (347-816 kgCO _{2eq} /an)	Q2 (891-1190 kgCO _{2eq} /an)	Q3 (1229-1589 kgCO _{2eq} /an)	Q4 (1639-2158 kgCO _{2eq} /an)	Q5 (2318-4099 kgCO _{2eq} /an)	P tendance ²
Distribution		N=7837	N=7919	N=7238	N=6190	N=5009	
Occupation des sols ³ (m ² /an)	Model 1 ⁴	1622 (1614-1631)	2659 (2645-2672)	3629 (3610-3648)	4862 (4835-4890)	7676 (7627-7725)	<0,0001
	Model 2 ⁵	1693 (1683-1702)	2714 (2700-2727)	3628 (3609-3646)	4742 (4715-4769)	7188 (7139-7238)	<0,0001
Consommation d'énergie primaire ^{3,4} (MJ/an)	Model 1 ⁴	3600 (3581-3619)	5113 (5086-5140)	6290 (6255-6324)	7699 (7653-7744)	10477 (10408-10547)	<0,0001
	Model 2 ⁵	3978 (3958-3997)	5364 (5340-5389)	6285 (6256-6314)	7259 (7222-7296)	8980 (8924-9036)	<0,0001
Dépense ³ (€/j) N=29210	Model 1 ⁴	5,81 (5,76-5,85)	6,44 (6,39-6,49)	7,21 (7,16-7,27)	8,26 (8,19-8,33)	10,00 (9,90-10,09)	<0,0001
	Model 2 ⁵	6,89 (6,84-6,93)	6,99 (6,95-7,03)	7,20 (7,16-7,25)	7,47 (7,42-7,52)	7,68 (7,62-7,74)	<0,0001

Abréviations : Q: quintile redressé,

¹ Les valeurs présentées sont des moyennes ajustées (IC95%) mesurées en fonction des marges d'observation ou des pourcentages.

² Les P-valeurs proviennent des tests de contrastes linéaires

³ Les variables n'ont pas de distribution normale, nous avons utilisé une log-transformation pour obtenir les résultats

⁴ Ajustement sur le sexe et l'âge

⁵ Ajustement sur le sexe, l'âge et l'apport énergétique

C/ Interprétation des résultats

Des études récentes, basées sur des régimes alimentaires modélisés ou observés, ont mis en évidence la contribution majeure de la consommation des aliments d'origine animale dans les émissions de gaz à effet de serre liées à l'alimentation (117,145,146,175). Au niveau individuel, une diminution de la consommation de produits d'origine animale, en particulier la viande de ruminants, reste un défi majeur et nécessaire pour maintenir l'augmentation de la température mondiale en dessous des 2 °C (7). D'autres études ont déjà montré qu'une faible contribution dans les régimes alimentaires des aliments d'origine animale ne réduit pas seulement les émissions de gaz à effet de serre, mais aussi l'occupation des sols et l'énergie nécessaire à la production (130,141,176).

Nous avons noté que l'apport énergétique des régimes augmente avec les quintiles d'émissions de gaz à effet de serre. Cette constatation concorde avec des études antérieures faisant état d'une relation linéaire entre l'apport énergétique et les émissions de gaz à effet de serre alimentaires (127,175). De plus, nous avons observé que les participants dont le régime alimentaire est à l'origine de peu de gaz à effet de serre consommaient davantage d'aliments végétaux, conformément aux résultats d'autres études observationnelles (146,175). Contrairement à l'étude de Temme (175), nous n'observons pas de différence de consommations d'aliments gras et sucrés ou salés entre les quintiles. Les participants du premier quintile (avec les régimes les moins émetteurs) ont une consommation de boissons alcoolisées un peu plus forte. Nous pensons que ce résultat peut s'expliquer par la structure de la cohorte, qui est constituée de volontaires souvent sensibles aux

questions de nutrition et déclarant ainsi pour la plupart une faible consommation (réelle ou non) de ces produits (177). Bien que la production d'alcool ou des aliments gras et sucrés ou salés impacte moins l'environnement que celle de la viande ou certains produits laitiers, leur consommation apporte peu de bénéfices nutritionnels. C'est pourquoi il est conseillé de limiter leur consommation (178).

Il est maintenant bien documenté que la qualité globale de l'alimentation diminue avec l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre (127,175,179). Les résultats montrent que le PANDiet (évaluant la probabilité d'adéquation des régimes avec les recommandations sur les nutriments) est en moyenne meilleur pour les participants du premier quintile. Ce score élevé s'explique surtout par un meilleur sous-score de modération (mesurant en grande partie la probabilité de respecter les limites de consommation pour les lipides, glucides, protéines, acides gras saturés, cholestérol et sodium). Ce sont les participants du troisième quintile qui présente le sous-score d'adéquation le plus élevé, ce qui signifie que ces participants ont la plus faible probabilité d'avoir une carence en nutriment. Concernant le mPNNS-GS (évaluant l'adéquation avec les repères du Programme National Nutrition Santé), ce sont aussi les participants du troisième quintile qui obtiennent le score le plus élevé. Ce résultat peut s'expliquer par la faible consommation de produits d'origine animale dans les deux premiers quintiles alors que les recommandations nutritionnelles françaises de 2001 encourageaient leur consommation : une ou deux portions de viandes, poissons ou d'œufs par jour et trois portions de produits laitiers. Ces repères ont aujourd'hui évolué et incitent à la réduction de la consommation de ces groupes d'aliments. Il est en effet possible de satisfaire ses besoins nutritionnels en remplaçant de manière appropriée des aliments d'origine animale (180).

Concernant le statut anthropométrique, les participants des deux premiers quintiles présentent en moyenne des indices de masse corporelle plus faibles. Un certain nombre d'hypothèses pourrait expliquer cette observation, comme des habitudes alimentaires plus propices à une bonne santé et en particulier des régimes plus végétaux et moins caloriques (181). D'autres études ont également mis en évidence les avantages pour la santé d'une alimentation émettant peu de gaz à effet de serre ou pauvre en viande (118,145,149). Néanmoins, le caractère observationnel et transversal de l'étude ne nous permet pas de conclure en termes de causalité.

Il est intéressant de noter que les participants dans les quintiles de régimes les moins émetteurs sont ceux qui consomment le plus d'aliments issus de l'agriculture biologique, tandis que les données disponibles sur le bilan carbone de la production actuelle en agriculture biologique montrent des

avantages limités de ce mode de production (182) et variables selon l'unité considérée. En effet, la production d'aliments d'origine animale et issue de l'agriculture biologique est parfois responsable de plus d'émissions de gaz à effet de serre, notamment en raison de l'allongement des cycles de production et d'un taux de croissance des animaux plus faible (183–185). Cependant, nos résultats montrent que les grands consommateurs d'aliments biologiques se trouvent dans les quintiles de régimes les moins émetteurs en gaz à effet de serre. On peut penser que les participants, dans les quintiles à faibles émissions de gaz à effet de serre, parviennent à compenser les émissions plus élevées de certains aliments lorsqu'ils sont issus de l'agriculture biologique, par une consommation réduite en aliments à fortes émissions de gaz à effet de serre, comme les viandes et produits laitiers.

Il convient de mentionner certaines limites de cette étude. Premièrement, les participants présentent des profils nutritionnels spécifiques, par leur statut de volontaires au sein d'une cohorte sur la nutrition et la santé. Les participants sont ainsi susceptibles d'adopter des comportements plus sains par rapport à ceux visibles en population générale. Ce qui peut nous avoir conduits à une sous-estimation de certains profils alimentaires moins propices à la santé. Cependant, cet échantillon spécifique a fourni une diversité intéressante de profils alimentaires pro-environnementaux. Deuxièmement, l'évaluation de la consommation alimentaire était réalisée par l'usage d'un questionnaire de fréquence qui, comme pour d'autres méthodes de recueil auto-administré, est sujet aux erreurs de mesure et aux biais de désirabilité. Au sein de notre cohorte, ce point est illustré par une consommation déclarée très élevée de fruits ou de légumes et peu d'aliments riches en sucre et en matières grasses et de boissons alcoolisées. Troisièmement, les données environnementales sont basées sur des exploitations agricoles enregistrées et ayant utilisé l'outil DIALECTE. L'usage des données de cet outil d'autodiagnostic agroenvironnemental des exploitations agricoles conduit à une sous-représentation des exploitations agricoles qui ne sont pas sensibles aux questions environnementales et dont les pressions sur l'environnement pourraient être plus fortes. Cela a pu conduire à une sous-estimation de l'impact environnemental de la production des régimes dans notre étude. Toutefois, le nombre élevé d'exploitations agricoles dans la base de données et l'utilisation de la valeur médiane qui est moins sensible aux valeurs extrêmes peuvent avoir partiellement permis de surmonter cette limitation. Seule la production agricole a été incluse dans l'analyse du cycle de vie ; ainsi, les phases de transformation, d'emballage ou de transport n'ont pas été prises en compte. Cette limitation doit être considérée comme relative puisque la majeure partie des impacts environnementaux se produisent, pour beaucoup d'aliments, dès la phase agricole (139,140,158). Les boissons alcoolisées ou les produits tropicaux sont des exceptions, mais ils contribuent souvent très peu au total du régime. Enfin, les trois indicateurs environnementaux évalués ne reflètent pas suffisamment toutes les pressions environnementales. D'autres indicateurs

tels que l'eutrophisation ou la biodiversité seraient importants à considérer. Cependant, l'utilisation de trois indicateurs est déjà un atout comparé aux études précédentes qui n'en utilisent souvent qu'un (145). De plus, la distinction entre les modes de production (biologique et conventionnelle) est rare et apporte de nouveaux éléments de réflexions dans l'étude des impacts sur l'environnement des régimes alimentaires.

d/ Conclusion de l'étude

Finalement, l'étude montre qu'au sein de la cohorte, l'adoption d'une alimentation à faibles émissions de gaz à effet de serre se caractérise par une consommation d'aliments d'origine animale réduite, et d'un apport énergétique plus faible. Nous n'avons pas observé de différences, entre les différents groupes de participants, dans les consommations d'aliments de faibles qualités nutritionnelles (alcool ou aliments gras et sucrés ou salés). Aussi, les régimes à faibles émissions de gaz à effet de serre observés dans notre cohorte sont de bonne qualité nutritionnelle, présentent une importante proportion d'aliments biologiques, nécessitent également moins de terres et d'énergie primaire pour être produits par rapport à des régimes alimentaires à plus fortes émissions. Enfin, leur prix moyen est plus faible.

3) Approche par des méthodes exploratoires et formation de clusters

Dans ce travail, nous souhaitons utiliser une méthode statistique exploratoire afin d'évaluer et de comparer la durabilité des régimes alimentaires observés au sein de la cohorte NutriNet-Santé avec un plus grand nombre d'indicateurs.

a/ Population d'étude et méthodes appliquées

Population d'étude

Pour cette étude, nous travaillons sur un échantillon de la cohorte NutriNet-Santé ayant répondu aux questionnaires FFQ-Bio (N=37685), qui n'ont pas été considérés comme des sous ou sur déclarants, qui n'ont pas de covariables manquantes et qui ont répondu aux questionnaires sur les motivations et comportements durables. Ainsi, l'échantillon final est constitué de 29 413 participants.

Méthode statistique

Afin de différencier les régimes alimentaires des participants selon leur durabilité, nous avons utilisé la méthode de régression des rangs réduits (RRR), qui fut utilisée et décrite pour la première fois avec des régimes alimentaires par Hoffmann (167). Cette méthode permet d'obtenir des fonctions linéaires des prédicteurs (ici ce sera les groupes alimentaires) qui maximisent l'explication de la variation des variables réponses (ici les indicateurs de durabilité). Nous avons sélectionné 8

indicateurs (les variables réponses) pour ce travail, présentés dans le Tableau 9 les émissions de gaz à effet de serre, la demande en énergie, l'occupation des sols, la contribution des aliments issus de l'agriculture biologique dans le régime, la densité énergétique du régime, le sous-score de modération du PANDiet, le sous-score d'adéquation du PANDiet et la part du revenu dédiée à l'alimentation. Le choix de ces indicateurs résulte d'un compromis entre les indicateurs identifiés dans la littérature, la possibilité d'estimer ces indicateurs à l'échelle individuelle, leur caractère continu et les données disponibles. Les variables de prédiction, c'est-à-dire les consommations moyennes (en g/j) de 17 groupes alimentaires (légumes, fruits, fruits secs et noix, poissons, viande de ruminants, les autres viandes, les œufs, les produits laitiers frais, les fromages, les aliments gras et sucrés ou salés, les féculents, les produits complets, les huiles, le beurre, les aliments composés, le soja et les boissons alcoolisées), ont été ajustées sur l'apport énergétique selon la méthode des résidus (155).

Tableau 9: Présentation des indicateurs de durabilité utilisés comme variables réponses pour cette analyse

Indicateurs	Dimension de la durabilité	Définition
Demande en énergie (MJ/an)	Environnement : raréfaction de certaines ressources énergétiques	La demande en énergie inclut l'utilisation des énergies renouvelables et non renouvelables définie par la méthode CED
Émissions de gaz à effet de serre (kgCO _{2eq} /an)	Environnement : changements climatiques	Quantité de dioxyde de carbone, méthane et protoxyde d'azote, pondérés par le potentiel de réchauffement sur 100 ans
Occupation des sols (m ² /an)	Environnement : raréfaction de la ressource et changements climatiques (par la déforestation)	Terre nécessaire à la production des aliments bruts, sans considération du temps d'usage des sols
Ratio d'aliments biologiques dans le régime (%)	Environnement : préservation de certaines ressources naturelles	Pourcentage de la masse des produits biologiques (identifiée par le label européen) dans le régime
Densité énergétique (kcal/100g)	Nutrition : consommation d'aliments denses en énergie	Calorie apportée en moyenne par 100g du régime
Sous-score d'adéquation du PANDiet (/100)	Nutrition : adéquation avec les recommandations françaises sur les nutriments	Probabilité que le régime respecte les recommandations d'adéquation pour 21 nutriments multipliés par 100
Sous-score de modération du PANDiet (/100)		Probabilité que le régime respecte les recommandations de limitation des nutriments pour lesquels les apports ne doivent pas dépasser une référence
Part du budget alloué à l'alimentation (%)	Économie : accessibilité économique du régime	Dépenses pour l'alimentation divisées par le revenu par unité de consommation

Afin de tester la reproductibilité de la méthode, nous avons évalué les coefficients de Pearson entre les deux premiers facteurs obtenus par la RRR, avec l'ensemble de l'échantillon et en prenant au hasard uniquement la moitié de l'échantillon. Nous avons réalisé 20 fois ce test avec des demi-échantillons différents.

Dans un second temps, nous avons réalisé une procédure de clustering en deux étapes. Ainsi, nous avons réalisé en premier lieu une classification hiérarchique ascendante, en utilisant la méthode de Ward, avec les deux premiers facteurs extraits de la RRR. L'étude du dendrogramme, des indicateurs statistiques (R^2 semi-partiel et le pseudo F) et des critères d'interprétation a poussé à considérer 6 clusters. Ensuite, les clusters ont été stabilisés par une procédure non hiérarchique des K-means utilisant le barycentre des clusters identifiés lors de la première étape.

Nous présentons par la suite, les moyennes ainsi que les intervalles de confiance 95% des 8 indicateurs de durabilité et des 17 groupes alimentaires ajustés sur l'apport énergétique par la méthode des résidus. Les caractéristiques sociodémographiques et de modes de vie entre les clusters ont été comparées par des tests du chi-2. L'erreur de premier ordre a été fixée à 5%. Les différences ont été testées statistiquement après corrections pour les tests multiples par la méthode de Dunnett.

b/ Résultats

L'échantillon est composé de 29413 participants, dont 74,8% de femmes. L'âge moyen est de 53,5 ans.

Extraction des facteurs

Les premiers et seconds facteurs extraits expliquent 20,25% et 6,04% respectivement, du total de la variation des indicateurs de durabilité et 9,29% et 8,67% respectivement, du total de la variation des groupes alimentaires. Les moyennes des coefficients de Pearson entre les facteurs obtenus dans l'échantillon et ceux obtenus dans un échantillon constitué de la moitié des participants sélectionnés au hasard sur les 20 tests sont élevées (0,999 et 0,986 respectivement), montrant une bonne reproductibilité de la méthode.

Le Tableau 10 présente les coefficients de corrélation entre les deux premiers facteurs extraits par la RRR et les indicateurs de durabilité.

Tableau 10: Pourcentage des variations expliquées par les deux premiers facteurs extraits de la RRR des consommations par groupe d'aliments et des indicateurs de la durabilité et coefficients de corrélation de Pearson (extrait d'un échantillon N=29413)

	Facteur 1	Facteur 2
Variation des groupes alimentaires expliquée ¹ (%)	9,29	8,67
Variation des indicateurs de durabilité expliquée (%)	20,25	6,04
Coefficient de corrélation de Pearson	X score 1	X score 2
Demande en énergie (MJ/an)	0,59	0,21
Occupation des sols (m ² /an)	0,72	-0,01
Émissions de gaz à effet de serre (kg CO _{2eq})	0,76	-0,02
Contribution des aliments biologiques dans le régime (%)	-0,32	0,23
Densité énergétique du régime (kcal/100g)	0,02	-0,49
Sous-score d'adéquation du PANDiet (/100)	-0,01	0,33
Sous-score de modération du PANDiet (/100)	-0,28	0,06
Part du budget alloué à l'alimentation (%)	0,00	0,19

¹ Les consommations des groupes d'aliments ont été ajustées sur l'apport énergétique en utilisant la méthode des résidus

Nous observons que le premier facteur est positivement corrélé avec la demande en énergie, l'occupation des sols, les émissions de gaz à effet de serre alors qu'il est négativement corrélé avec la contribution des aliments biologiques dans le régime et le sous-score de modération du PANDiet. Le second facteur est positivement corrélé avec la demande en énergie, la contribution des aliments biologiques dans le régime, la part du budget alloué à l'alimentation et le sous-score d'adéquation du PANDiet.

Description des clusters

Nous avons identifié à partir des deux premiers facteurs extraits de la RRR, 6 clusters regroupant 3,90% (cluster 1), 17,05% (cluster 2), 27,05% (cluster 3), 23,06% (cluster 4), 23,07% (cluster 5) et 5,86% (cluster 6) de la population d'étude.

Tableau 11: Moyennes des variables réponses incluses dans la RRR présentées par cluster et pour l'échantillon total, NutriNet-Santé, 2014 (extrait d'un échantillon N=29413)¹

Indicateurs	Cluster 1 (N=1148)	Cluster 2 (N=5014)	Cluster 3 (N=7957)	Cluster 4 (N=6782)	Cluster 5 (N=6787)	Cluster 6 (N=1725)	Total (N=29413)
Consommation d'énergie primaire (MJ/j)	34,04 (33,68-34,4)	20,77 (20,6-20,94)	18,51 (18,37-18,64)	14,17 (14,03-14,32)	14,34 (14,19-14,49)	20,05 (19,75-20,34)	17,63 (17,54-17,72)
Émissions de gaz à effet de serre (kg CO _{2eq} /j)	10,78 (10,67-10,89)	4,74 (4,69-4,79)	4,82 (4,78-4,87)	3,18 (3,13-3,22)	2,61 (2,57-2,66)	3,1 (3,01-3,19)	4,05 (4,02-4,08)
Occupation des sols (m ² /j)	28,65 (28,35-28,95)	12,27 (12,12-12,41)	12,46 (12,34-12,57)	8,22 (8,1-8,34)	7,09 (6,96-7,21)	8,27 (8,02-8,51)	10,6 (10,52-10,67)
Ratio d'aliments biologiques en gramme (/1)	0,18 (0,16-0,19)	0,27 (0,27-0,28)	0,20 (0,19-0,20)	0,26 (0,26-0,27)	0,43 (0,42-0,43)	0,49 (0,48-0,51)	0,30 (0,29-0,30)
Indicateurs nutritionnels							
Densité énergétique du régime (kcal/100 g)	87,5 (86,4-88,6)	67,9 (67,3-68,4)	83,4 (82,9-83,8)	90,7 (90,2-91,2)	75,9 (75,4-76,4)	62,8 (61,9-63,8)	79,65 (79,4-79,9)
Sous-score d'adéquation (/100)	80,0 (79,2-80,7)	80,7 (80,4-81,1)	71,4 (71,1-71,7)	69,6 (69,3-69,9)	78,6 (78,3-78,9)	85,2 (84,6-85,8)	75,38 (75,22-75,55)
Sous-score de modération (/100)	42,2 (41,4-43,0)	56,7 (56,3-57,1)	55,7 (55,3-56)	58,1 (57,8-58,5)	63,5 (63,2-63,9)	58,5 (57,8-59,2)	57,85 (57,68-58,03)
Indicateurs économiques							
Part du budget alloué à l'alimentation (%)	16,2 (15,7-16,7)	12,5 (12,3-12,8)	10,7 (10,5-10,9)	10,5 (10,3-10,5)	12,1 (11,9-12,3)	18,4 (18,0-18,8)	11,96 (11,86-12,06)

¹ Les valeurs présentées sont des moyennes accompagnées par les intervalles de confiance à 95%.

² Nous avons testé les différences de moyennes entre clusters par des ANOVA, toutes les P-valeur sont <0.0001.

Tableau 12: Caractéristiques sociodémographiques et de mode de vie des participants par cluster, NutriNet-Santé, 2014, (N=29413)¹

	Cluster 1 (N=1148)	Cluster 2 (N=5014)	Cluster 3 (N=7957)	Cluster 4 (N=6782)	Cluster 5 (N=6787)	Cluster 6 (N=1725)	P ²
Sexe (%)							0,06
Femme	55,31	79,90	69,62	73,65	79,61	82,20	
Homme	44,69	20,10	30,38	26,35	20,39	17,80	
Apport énergétique (kcal/j)	2,490 (2,454-2,525)	1,932 (1,915-1,949)	1,902 (1,889-1,916)	2,025 (2,010-2,039)	1,984 (1,970-1,999)	2,301 (2,272-2,330)	
Prix du régime (€/j)	10,53 (10,38-10,69)	8,4 (8,32-8,47)	7,06 (7-7,12)	6,51 (6,45-6,58)	7,72 (7,66-7,79)	11,34 (11,22-11,47)	
Âge							<0,000 1
<25 ans	1,13	0,98	1,92	2,79	1,80	1,80	
25-35 ans	6,79	4,71	12,66	16,31	9,68	6,32	
35-50 ans	23,00	16,41	25,55	29,30	20,86	15,94	
50-65 ans	42,86	44,14	36,72	31,39	40,77	46,26	
≥65 ans	26,22	33,77	23,15	20,22	26,89	29,68	
Qualification scolaire							<0,000 1
Inférieur au baccalauréat	27,35	27,00	20,38	17,28	19,89	25,57	
Équivalent au baccalauréat	16,38	15,64	14,33	14,20	14,25	15,01	
Post-baccalauréat	56,27	57,36	65,29	68,52	65,86	59,42	
Revenu par unité de consommation							0,40
Refuse de déclarer	5,31	6,84	5,39	5,43	6,62	7,83	
<1200 euros	10,89	9,47	10,81	13,30	12,02	13,04	
1200-1800 euros	24,74	21,56	23,25	24,45	22,50	22,14	
1800-2700 euros	24,65	28,78	26,73	27,94	27,26	27,13	
>2700 euros	34,41	33,35	33,82	28,89	31,60	29,86	
Taille de l'agglomération							0,06
Milieu rural	23,61	21,76	22,92	21,05	22,55	23,78	
Unité urbaine de moins de 20 000 habitants	15,00	15,36	15,42	15,44	14,72	16,11	
Unité urbaine entre 20 000 et 200 000 habitants	18,67	20,04	17,39	18,89	19,83	17,77	
Unité urbaine de plus de 200 000 habitants	42,73	42,84	44,26	44,61	42,90	42,33	
Activité physique							<0,000 1
>60 min/j	32,58	37,26	29,80	28,89	36,97	46,55	
30-60 min/j	31,01	34,36	36,56	38,10	37,98	31,59	
<30 min/j	25,17	16,75	22,95	22,24	14,91	10,90	
Données manquantes ³	11,24	11,63	10,69	10,78	10,14	10,96	
Indice de masse corporelle (IMC)							0,05
IMC<18.50 kg/m ²	1,39	2,51	2,76	6,06	6,78	8,46	
18.50-24.99 kg/m ²	42,16	52,53	58,25	66,18	68,22	63,48	
25.00-29.99 kg/m ²	35,19	30,36	27,86	20,38	19,01	20,52	
IMC≥30.00 kg/m ²	21,25	14,60	11,12	7,39	6,00	7,54	
Consommation de tabac							<0,000 1
Ancien fumeur	44,03	44,16	39,17	35,73	42,02	46,03	
Fumeur occasionnel	3,22	2,69	3,59	4,11	2,99	2,20	

Fumeur	11,06	6,74	9,21	8,26	5,41	3,88	
Non-fumeur	41,38	46,41	48,02	51,90	49,58	47,88	
Consommation d'alcool							<0,000 1
Abstinent	5,66	5,54	3,80	4,29	6,65	11,88	
<20 g/j pour les femmes et <30 g/j pour les hommes	82,40	87,30	86,44	85,90	85,84	81,80	
≥20 g/j pour les femmes et ≥30 g/j pour les hommes	11,93	7,16	9,76	9,81	7,51	6,32	
Régime							<0,000 1
Omnivore	100	99,92	100,00	97,05	91,13	88,41	
Végétalien	0	0,08	0,00	2,46	3,08	5,22	
Végétarien	0	0,00	0,00	0,49	5,79	6,38	

¹ Les valeurs présentées sont des pourcentages ou des moyennes accompagnées par leur intervalle de confiance à 95%

² Les P valeurs sont basées sur des tests du χ^2 de Mantel-Haenszel

³ Comme certaines questions étaient optionnelles, nous avons beaucoup de données manquantes

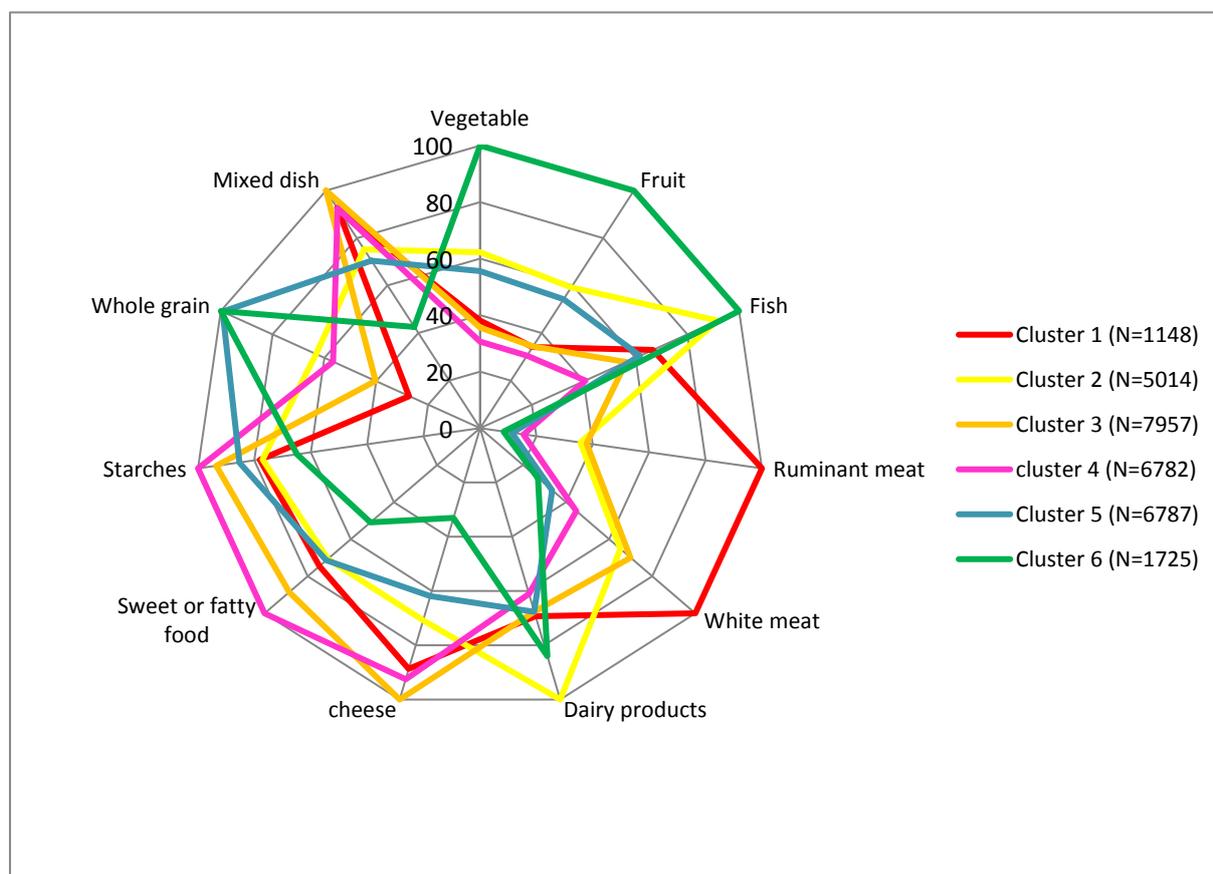


Figure 12: Distinction dans les consommations des groupes d'aliments par clusters, NutriNet-Santé, 2014 (N=29413)¹

¹ La moyenne des consommations de chacun des clusters est comparée avec le maximum des consommations observé indexé à 100

Les participants du premier cluster présentent un régime dont la production entraîne d'importants impacts pour l'environnement. Ces régimes ont également les scores nutritionnels les plus faibles et sont peu abordables. Ce cluster présente la consommation de viande la plus forte : elle est de 162,4g/j pour la viande de ruminants et de 129,5g/j pour les autres viandes. On observe également une importante consommation des produits laitiers (frais et fromages) ainsi que celle des aliments gras et sucrés ou salés et une consommation de fruits et légumes relativement basse par rapport aux autres clusters (562g/j contre 729g/j en moyenne dans l'échantillon). Nous remarquons que les hommes et les personnes ayant des modes de vie délétères pour la santé (consommation de tabac et d'alcool notamment) sont relativement plus présents dans ce cluster.

Les impacts environnementaux des régimes des participants du deuxième cluster sont également importants, bien qu'ils ne soient pas les plus élevés. Ces régimes sont de plutôt bonne qualité nutritionnelle, les indicateurs nutritionnels présentent des valeurs élevées à l'exception du score de modération du PANDiet. L'étude de la composition des régimes du cluster 2 montre qu'ils sont assez variés, avec des consommations proches de la moyenne pour tous les groupes d'aliments à l'exception des produits laitiers frais, qui sont très consommés. Les participants de ce cluster sont plutôt des personnes âgées, avec du surpoids, mais dont les modes de vie sont plutôt sains (peu de consommation de tabac, d'alcool et une activité physique régulière).

Les impacts environnementaux des régimes des participants du troisième cluster sont proches de ceux du cluster 2. Cependant, la qualité nutritionnelle de leur régime est moins bonne. Les régimes des participants du cluster 3 sont plus abordables, puisque la part du budget alloué à l'alimentation des participants du cluster 3 est en moyenne plus faible. La contribution des aliments d'origine animale dans ce cluster est semblable à celle des participants du cluster 2. Toutefois, les produits gras et sucrés ou salés (144g/j contre 132g/j), les boissons alcoolisées (118dl/j contre 101dl/j) et les aliments mixtes (40g/j contre 33g/j) sont plus consommés. Les participants du troisième cluster sont plus jeunes et ont un niveau d'étude post-baccalauréat. Dans les trois premiers clusters présentés, nous n'avons quasiment pas de végétariens et pas de végétaliens.

Les participants du cluster 4 ont un régime dont la production impacte moins l'environnement par rapport aux trois premiers clusters. La contribution des aliments biologiques dans le régime est faible. Nous retrouvons également dans ce cluster les régimes les plus abordables. Par contre, ces régimes sont très denses en énergie et présentent des sous-scores du PANDiet, faibles par rapport aux régimes des autres clusters. La consommation des produits gras et sucrés ou salés (163g/j) et de féculents (193g/j) est élevée, alors que celle des fruits et légumes (477g/j) et des produits d'origine

animale est relativement faible (83/j). Les participants du cluster 4 sont plutôt jeunes, non-fumeurs et sédentaires.

Par rapport aux autres régimes, les régimes des participants du cinquième cluster contribuent le plus faiblement aux émissions de gaz à effet de serre, et nécessitent moins de terre. Les régimes dans ce cluster sont de bonnes qualités nutritionnelles. De plus, ces régimes sont relativement abordables et la contribution des aliments biologiques est élevée. Les régimes de ce cluster sont caractérisés par une consommation élevée en fruits et légumes, en féculents et aliments à base de soja alors que les viandes, et en particulier les viandes de ruminants, sont consommées avec grande modération (18,5g/j pour la viande de ruminants). Dans ce cluster, on retrouve une grande proportion de participants ayant eu le baccalauréat et ayant poursuivi leur étude, physiquement actif et une faible proportion de participants avec une obésité ou un surpoids. Nous observons également une grande proportion de participants se déclarant végétariens ou végétaliens.

Enfin, les régimes des participants dans le cluster 6 sont caractérisés par la plus forte consommation de fruits et légumes, de soja, d'aliments complets et de poissons et la plus faible consommation de viande (49g/j), de boissons alcoolisées (60dl/j), d'aliments gras et sucrés ou salés (83g/j) et de plats composés (17g/j). Ces régimes ont la meilleure qualité nutritionnelle, selon les sous-scores du PANDiet. Les impacts environnementaux liés à la production de ces régimes sont faibles, à l'exception de la demande en énergie. Les participants de ce cluster utilisent une part importante de leur budget pour l'alimentation. Les caractéristiques sociodémographiques et de modes de vie des participants du cluster 6 sont proches de celles du cluster 5, en particulier pour le revenu, le statut anthropométrique et la consommation de tabac. Ils sont néanmoins un peu plus âgés et moins diplômés. Les femmes sont en proportion plus nombreuses que dans le cluster 5.

c/ Interprétation des résultats

Finalement, le cluster 1 rassemble un faible pourcentage de notre échantillon. Les régimes de ces participants ne sont pas durables selon les critères que nous nous sommes donnés. La production des régimes des participants des clusters 2 et 3 induits d'importants impacts sur l'environnement. Alors que les clusters 4, 5 et 6 regroupent des participants ayant des régimes dont la production est plus propice à l'environnement. Néanmoins, les régimes de ces trois derniers clusters se distinguent sur les critères nutritionnels et économiques. En effet, les régimes les plus abordables sont également de moins bonne qualité nutritionnelle, et vice versa (cluster 4 versus cluster 6). Finalement, les régimes des participants du cluster 5 (regroupant 23,07% de l'échantillon) présentent un bon compromis entre l'ensemble des dimensions de la durabilité testées dans cette étude. Leurs

régimes sont diversifiés, mais contiennent peu d'aliments d'origine animale et en particulier de viande de ruminants.

Contribution des aliments d'origine animale aux impacts environnementaux des régimes

Nos résultats montrent que les impacts sur l'environnement des régimes alimentaires contenant peu d'aliments d'origine animale sont plus faibles. En effet, les régimes des participants du cinquième quintile (évaluer comme le plus durable) sont à l'origine de 36% des émissions de gaz à effet de serre en moins, 19% d'énergie en moins et 33% de terres occupées en moins par rapport à la moyenne de notre échantillon. La contribution majeure des aliments d'origine animale aux impacts environnementaux a déjà bien été documentée (129,130,141,173). En effet, la récente revue de la littérature d'Aleksandrowicz *et al.* conclut que la transition d'un régime de type western vers un régime alternatif permet de diminuer les émissions de gaz à effet de serre de 22%, une réduction de l'occupation des sols de 28% et du besoin en eau de 18% (129). Récemment, Briesbroek *et al.* ont utilisé la même méthode statistique de régression des rangs réduits (RRR), avec deux variables explicatives : les émissions de gaz à effet de serre et un index de la qualité nutritionnelle des régimes hollandais. Son objectif était d'identifier des régimes alimentaires à la fois écologiques et de bonnes qualités nutritionnelles au sein d'un échantillon d'adultes hollandais. Parmi les deux types de régimes identifiés, un régime très végétalisé permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre liées à sa production. Une autre étude conclut que des régimes contenant moins d'aliments d'origine animale permettent de réduire la demande en énergie de 2,44% par rapport au régime moyen (186). La méthode de recueil des consommations alimentaires, et le périmètre des ACV sont différents.

Place des autres groupes d'aliments dans la durabilité des régimes

Dans les clusters où les régimes des participants sont plus végétaux, la viande est remplacée par d'autres groupes d'aliments. En effet, les régimes des clusters 5 et 6 sont plus riches en produits laitiers frais, poissons, soja, fruits et légumes et féculents raffinés ou brutes. Alors que dans le cluster 4, le fromage, les féculents et les aliments gras et sucrés ou salés sont privilégiés. Les substitutions de groupes alimentaires dans le cluster 4 entraînent une réduction de la qualité nutritionnelle des régimes. Des études ont effectivement conclu que réduire la consommation d'aliments denses en énergie permet de réduire les prévalences de certaines maladies chroniques à déterminants nutritionnels (137,173) et contribue à l'atténuation des changements climatiques (137,175).

De plus, nous avons observé que la production des régimes des clusters 4, 5 et 6 contribue moins aux impacts sur l'environnement que la production des régimes des trois autres clusters. Toutefois, nous pouvons observer des différences sur les indicateurs environnementaux entre ces trois clusters. En

effet, les régimes des participants des clusters 5 et 6 nécessitent plus d'énergie par rapport à ceux des participants du cluster 4. Alors que les indicateurs relatifs aux changements climatiques et aux besoins des terres sont meilleurs pour les clusters 5 et 6. Cette constatation pourrait s'expliquer par des consommations de fruits et légumes plus importantes dans les clusters 5 et 6. L'horticulture et le maraîchage nécessitent en effet une quantité d'énergie non négligeable pour plusieurs étapes : l'irrigation, la fertilisation, les traitements phytosanitaires, ou l'usage de plastiques, même si ces usages connaissent de fortes variations en fonction des techniques, et des modèles de production mis en place (par exemple serre chauffée ou pleins champs) et les saisons de culture (187,188). Il existe des techniques permettant de produire des fruits et légumes avec moins d'énergie. Une étude a évalué les conséquences pour l'environnement d'une augmentation de la consommation de fruits et légumes (189). Elle conclut que les recommandations sur l'augmentation de la consommation de fruits et légumes apportent des effets positifs pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et l'acidification. Une augmentation de 5% de la consommation de fruits et légumes entraînerait une diminution de la consommation de produits laitiers et une substitution entre les viandes rouges et les viandes blanches (189).

Un autre facteur lié aux faibles impacts des régimes du cluster 4 repose sur l'apport énergétique moindre par rapport aux régimes des participants des clusters 5 et 6. Des études ont montré que plus les régimes sont caloriques, plus leurs impacts (en particulier les émissions de gaz à effet de serre) sont importants (141).

Il faut également noter que les régimes des participants du cluster 6 sont riches en poissons (+37% par rapport à la moyenne de l'échantillon). Plusieurs études ont montré que les techniques de pêche les plus utilisées actuellement ne sont pas durables notamment à cause de l'épuisement des ressources en poissons (190,191). Les indicateurs considérés dans l'étude évaluent mal les impacts environnementaux de la pêche. C'est pourquoi nous pouvons penser que si d'autres indicateurs environnementaux étaient considérés, le cluster 6 serait moins favorable à l'environnement. Aussi, des questions toxicologiques se posent concernant la consommation de poissons à cause de l'accumulation de certains contaminants (métaux lourds ou organochlorés) dans leurs tissus adipeux (192). C'est pour ces raisons qu'il est maintenant en France conseillé de consommer du poisson en variant les espèces et en favorisant ceux qui proviennent de la pêche durable (173).

Opposition entre une bonne qualité nutritionnelle des régimes et leur accessibilité économique

Nos résultats montrent que les régimes avec les meilleures qualités nutritionnelles (le cluster 6) sont les moins abordables et les plus chers, alors que les régimes les plus abordables (dans le cluster 4)

sont de moins bonne qualité nutritionnelle. Néanmoins, les régimes présentant le meilleur compromis entre les indicateurs évalués dans cette étude (cluster 5) ne sont pas les plus chers et les moins abordables. Ce dernier résultat est en désaccord avec une étude australienne dont l'objectif était d'évaluer l'accessibilité économique d'un panier alimentaire sain et durable dans différents quartiers avec des niveaux socio-économiques différents (évaluer selon les revenus, le niveau d'étude et d'emplois) (193). Les auteurs ont rapporté que les paniers durables et sains sont les plus chers et les moins abordables dans tous les types de quartiers considérés dans l'étude (193). Ces différences peuvent s'expliquer par plusieurs hypothèses. En effet, dans l'étude australienne le panier durable est construit théoriquement selon des recommandations alors que nous avons travaillé avec des régimes observés. Aussi, le prix des régimes n'a pas été évalué selon les lieux d'habitations comme c'est le cas dans l'étude australienne. Enfin, les régimes des participants du cluster 5 présentent un bon compromis entre l'ensemble des dimensions de la durabilité, mais ne doivent pas s'interpréter comme des optimums.

La consommation d'aliments biologiques liés à des régimes alimentaires plus sains

Les résultats de l'étude montrent un lien positif entre un régime de bonne qualité nutritionnelle (dans les clusters 5 et 6) et une forte proportion d'aliments issus de l'agriculture biologique dans le régime. Une précédente étude au sein de la cohorte montre que les régimes alimentaires biologiques sont souvent associés à une composition plus végétalisée (151). Comme dans d'autres études, la consommation d'aliments issus de l'agriculture biologique est souvent associée à une meilleure qualité nutritionnelle à l'exception de certaines recommandations sur des nutriments relatives à la consommation d'aliments d'origine animale (143,194). De plus, les impacts environnementaux réduits des régimes des participants dans les clusters 5 et 6 peuvent aussi s'expliquer par les modes de production. En particulier, les modes de production biologiques permettent de diminuer les surplus d'azote et l'usage de pesticides et d'engrais de synthèse (106,107). Ce qui peut avoir un effet dans la réduction du besoin en énergie.

Limites et forces de l'étude

Il est nécessaire de souligner quelques limites liées à ce travail. En effet, les résultats s'appuient sur des données collectées auprès de volontaires engagés dans une cohorte dont l'objet d'étude est la nutrition et la santé. Ainsi, l'extrapolation des résultats à la population française doit se faire avec prudence. En effet, les niveaux d'études, les modes de vie sains et la proportion importante de femmes retrouvés au sein de la cohorte ne sont pas représentatifs de la population française. Ces caractéristiques sont connues pour être des déterminants d'une consommation plus durable (195,196). Elles ont certainement influencé nos résultats. Un échantillon plus large avec des

comportements plus divers nous aurait donné des éléments de réponses plus robustes sur l'acceptabilité des régimes alimentaires jugés comme plus durable. Deuxièmement, les données d'impacts environnementaux n'incluent pas les phases de transport, et de transformation. Ce qui pour la plupart des aliments représente une faible limite, car la majeure partie des impacts auraient lieu lors de la production agricole (160,161). Aussi, les valeurs des indicateurs environnementaux retenus pour chaque item correspondent à la médiane d'un échantillon de fermes qui ont eu recours à l'outil DIALECTE de diagnostic environnemental. On a noté dans la base de données une sous-représentation des fermes avec des pratiques les moins vertueuses pour l'environnement. Néanmoins, l'usage de la médiane permet de réduire la sensibilité aux valeurs extrêmes qui influencent fortement les valeurs. Dans les données de prix, il faut garder en tête qu'il y a deux ans de différence entre les prix des aliments de la base Kantar et la collecte des consommations alimentaires. En effet, nous avons utilisé les données de la base Kantar disponible au moment où les bases de données ont été construites. Enfin, les régimes identifiés comme les plus durables ne sont pas des optimums et ne peuvent pas être considérés comme des références pour la population, mais comme un compromis dans notre échantillon entre les dimensions de la durabilité étudiées.

L'usage de la RRR nous a permis d'extraire deux facteurs expliquant nos nombreux indicateurs. Ces deux facteurs résument l'information, et nous ont permis de distinguer six clusters. L'usage de cette méthode de réduction des dimensions, basée sur la structure de nos données, est particulièrement innovant dans ce champ d'études. Son intérêt est aussi de diminuer la subjectivité dans la formation des clusters. Néanmoins, la RRR n'est pas complètement une méthode a posteriori, car elle nécessite que les utilisateurs fassent des choix arbitraires notamment sur les indicateurs à inclure et le nombre de facteurs à conserver. Aussi, le nombre de clusters a été choisi arbitrairement même si le dendrogramme et des indicateurs statistiques nous ont guidés dans ce choix. La procédure de clustering en deux étapes nous a permis de stabiliser les résultats et en particulier pour les personnes à la limite entre plusieurs clusters.

4) Approche a priori par la construction d'un score, le SDI

Enfin, nous avons souhaité évaluer la durabilité des régimes alimentaires par l'usage d'un score construit a priori et regroupant des indicateurs de différents domaines de la durabilité de l'alimentation.

a/ Population d'étude et méthodes appliquées dans ce travail

Population d'étude

Pour les présentes analyses, nous avons travaillé sur un échantillon de 29388 participants ayant répondu au questionnaire alimentaire et de comportements vis-à-vis de l'agriculture biologique, qui n'ont pas été déclarés comme sur ou sous déclarants, et qui avait l'ensemble de leurs covariables disponibles.

Développement et calcul du SDI

Une revue de la littérature des principaux indicateurs précédemment utilisés pour évaluer la durabilité de l'alimentation a été réalisée en septembre 2017 (109,128,136,174,197–205).

Parmi ces indicateurs, nous avons retenu ceux qui (1) couvraient au moins un des quatre domaines suivants : environnement, économie, socioculturel et nutrition en évitant les redondances, et qui (2) se mesurent à l'échelle individuelle (par exemple la morbidité ne convenait pas, car à elle se mesure à l'échelle d'une population). Les indicateurs sélectionnés et considérés pour évaluer l'indice sont présentés dans le Tableau 13.

Tableau 13: Indicateurs d'évaluation de la durabilité des régimes alimentaires recueillis dans la littérature, choix de leur inclusion ou exclusion dans la construction du SDI et transformations potentielles

Indicateurs	Liens avec la durabilité des régimes alimentaires	Choix	Transformation	Indicateurs présents dans le SDI
Nutrition				
Balance énergétique	Une consommation excessive de calories est connue pour être un facteur de risque de plusieurs événements de santé et représente un gaspillage. Alors qu'une trop faible consommation énergétique peut induire des malnutritions	Inclus	Nous prenons la valeur absolue de la différence entre les besoins caloriques estimés par l'équation de Schofield et les apports caloriques déclarés	Valeur absolue de la différence entre les besoins et les apports caloriques déclarés
Densité énergétique	La diversité alimentaire et la couverture des besoins en micronutriments essentiels afin d'éviter les carences et les événements de santé délétères associés.	Inclus	Utilisation du score générique d'adéquation nutritionnelle.	PANDiet (121)
Score de diversité des régimes				
Déficit d'apports en micronutriments				

Environnement				
Consommation d'eau	La ressource en eau est dans certaines zones en cours d'épuisement	Exclus : manque de données		
Bilan azoté	Un bilan azote équilibré est essentiel pour éviter l'eutrophisation	Exclus : manque de données		
Émissions de gaz à effet de serre	Les émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique sont à l'origine des changements climatiques	Inclus	Utilisation du score générique du pReCiPe	
Usage d'énergie non renouvelable (sans les énergies fossiles)	La production alimentaire est parfois très dépendante des ressources énergétiques non renouvelables, dont les réserves s'épuisent	Inclus		
Usage des énergies fossiles				
Usage des terres	Les terres arables sont limitées, et dans certains cas la mise à disposition de terres pour l'agriculture menace la biodiversité, et peut être à l'origine d'émissions de gaz à effet de serre indirects.	Inclus		
Préservation de la biodiversité dans les fermes	Certaines méthodes de production jouent un rôle dans l'extinction de la biodiversité.	Inclus	Certaines méthodes de culture permettent de maintenir des écosystèmes en place.	Contribution des aliments issus de l'agriculture biologique
Saisonnalité	La préférence pour les aliments de saison permet d'éviter des émissions de gaz à effet de serre dû au transport des aliments ou à l'usage de chambre froide	Exclus : manque de données		
Packaging	La réduction des emballages permet d'éviter des gaspillages.	Exclus : manque de données		
Économie				
Pertes et gaspillages	Les pertes et les gaspillages sont à l'origine de coûts environnementaux et économiques importants.	Exclus : manque de données		
Abordable : budget alloué à l'alimentation	Les régimes alimentaires doivent pouvoir être accessibles économiquement à tous et en particulier aux personnes avec de faibles revenus.	Inclus	Aucune	Proportion du revenu alloué à l'alimentation
Commerce équitable	Le commerce équitable est une manière alternative de faire du commerce qui contribue à assurer un revenu juste et garanti, des conditions de travail décentes et l'autonomie des producteurs	Exclus : manque de données		

Pratiques alimentaires				
Locale (produit proche du lieu d'habitation/ régional (produits selon ou avec des spécificités territoriales)	La consommation de ces produits contribue au développement du territoire.	Inclus	Création d'un indice d'évaluation de la fréquentation des lieux d'achats alternative aux grandes surfaces	Indice des : lieux d'achat différents des grandes surfaces
Diversité des lieux d'approvisionnements	Les lieux d'approvisionnements autres que les grandes surfaces permettent aux producteurs de récupérer plus de valeurs de leur production, et souvent à gagner du revenu. De plus, ces lieux d'approvisionnement alternatif encouragent les interactions entre producteurs et consommateurs afin de se partager la gestion du bien commun qu'est l'alimentation	Inclus		
Continuité culturelle	Garantir le respect des traditions culturelles et des préférences est essentiel pour garantir l'acceptabilité.	Exclus : manque de données		
Aliments cuisinés	L'usage d'aliments cuisinés minimise le temps consacré aux activités liées à la cuisine qui représente une opportunité pour des échanges, la préservation des traditions et évite la standardisation des recettes.	Inclus		Contribution des aliments cuisinés (plat préparé, surgelé et boîtes de conserve) dans le régime

*Adapté de la littérature scientifique disponible en septembre 2017

Afin de mesurer un indice d'évaluation de la durabilité des régimes au niveau individuel, que nous avons appelé le SDI pour *Sustainable Diet Index*, nous avons attribué à chacun des sept indicateurs une valeur de 1 à 5, en utilisant les valeurs des quintiles de la population comme seuils. Nous attribuons 1 point aux participants du premier quintile, 2 points aux participants du second quintile et ainsi de suite pour les indicateurs associés positivement à la durabilité. À l'inverse, pour les indicateurs inversement associés à la durabilité, les allocations étaient inversées. Les points attribués selon les seuils et les indicateurs sont présentés dans le Tableau 14.

Tableau 14: Description des indicateurs et de la procédure de calcul du SDI (Sustainable Dietary Index)

	Indicateurs	Objectif	Allocation des points	Pondération dans les sous-indices	Évaluation des sous-indices
Sous-indice nutrition (/5)	Valeur absolue de la différence entre les besoins caloriques et les apports d'après les équations de Scholfield consommées(kcal/j)	Reflète l'adéquation entre les calories consommées et nécessaires	1 point : ind>1018 2 points : 1018≤ind<681 3 points : 681≤ind<433 4 points : 433≤ind<211 5 points : ind≤211	1/2	Sous-indice nutrition=somme des points X pondérations
	PANDiet (/100)	Reflète l'adéquation entre les apports en nutriments et les recommandations françaises pour 24 nutriments.	1 point : ind≤60.7 2 points : 60.7<ind≤64.7 3 points : 64.4<ind≤68.2 4 points : 68.2<ind≤72.8 5 points : ind>72.8	1/2	
Sous-indice environnement (/5)	Occupation des terres (m ² /an) : surfaces nécessaires pour produire le régime	Les trois indicateurs sont regroupés dans le pReCiPe	1 point : ind>0.38 2 points : 0.38≤ind<0.29 3 points : 0.29≤ind<0.23 4 points : 0.23≤ind<0.17 5 points : ind≤0.17	3/4	Sous-indice environnement=somme des points X pondérations
	Émissions de gaz à effet de serre (kgCO ₂ /and) : Quantité de CO ₂ , CH ₄ et NO ₂ émis lors de la production des aliments du régime en pouvoir de réchauffement sur 100 ans				
	Consommation d'énergie primaire (MJ/an)				
	Contribution des aliments biologiques dans le régime (% en g)	Limiter l'extinction de la biodiversité dans les fermes	1 point : ind≤3.02 2 points : 3.02<ind≤15.5 3 points : 15.5<ind≤30.3 4 points : 30.3<ind≤54.1 5 points : ind>54.1	1/4	
Sous-indice économie (/5)	Proportion du revenu destinée à l'alimentation (%)	Proxy de l'accessibilité économique des régimes	1 point : ind>16.4 2 points : 16.4≤ind<11.4 3 points : 11.4≤ind<8.45 4 points : 8.45≤ind<5.40 5 points : 5.40≤ind<1.27	1	Sous-indice économie= somme des points X pondérations
Sous-indice des pratiques alimentaires	Lieux d'approvisionnement (/2)	Indice d'évaluation de la fréquentation des lieux	1 point : ind<0.28 2 points : 0.28≤ind<0.45	1/2	Sous-indice des pratiques alimentaires=

(5)		d'approvisionnements différents des supermarchés	3 points : $0.45 \leq \text{ind} < 0.60$ 4 points : $0.60 \leq \text{ind} < 0.79$ 5 points : $\text{ind} \geq 0.79$		somme des points X pondérations
	Consommation d'aliments cuisinés (/3)	Indice d'évaluation des consommations des aliments préparés	1 point : $\text{ind} \geq 1.75$ 2 points : $\text{ind} = 1.5$ 3 points : $\text{ind} = 1.25$ 4 points : $\text{ind} = 1.00$ 5 points : $\text{ind} \leq 1$	1/2	
Total (/20)	SDI=Nutrition+ Environnement + Économie + pratiques alimentaires				

Ind : individu

Les indicateurs d'un même domaine sont regroupés dans le même sous-indice et ont le même poids, à l'exception du sous-indice environnemental. Nous avons attribué une pondération trois fois plus importante au pReCiPe, qui regroupe trois indicateurs, par rapport à l'indicateur de proportion des aliments issus de l'agriculture biologique dans le régime. Les sous-indices ont été mesurés en sommant et pondérant les points de chaque indicateur contenu dans le domaine. Chaque sous-indice a été standardisé pour être compris entre 1 et 5. La définition de l'alimentation durable ne hiérarchisant pas les domaines, chacun des sous-indices apporte le même nombre de points. Finalement, nous obtenons le SDI en sommant les points des quatre sous-indices, et ainsi les valeurs du SDI sont comprises entre 4 et 20.

Évaluation de la validité de l'indice

Nous décrivons ci-dessous, la manière dont nous avons évalué la validité du contenu et du construit du SDI.

L'évaluation de la validité du contenu du SDI a consisté à étudier la représentativité, les corrélations et la pertinence des indicateurs et des sous-indices dans l'indice (205,206). Premièrement, la pertinence de chaque indicateur est déterminée en se référant à la définition d'un régime durable de la FAO. Les arguments ayant motivé le choix des indicateurs dans le calcul du SDI sont présentés dans le Tableau 13. Deuxièmement, nous avons calculé les coefficients de corrélation de Pearson entre les indicateurs et le SDI et entre les sous-indices et le SDI afin de vérifier la non-unidimensionnalité. Enfin, pour mieux appréhender l'influence de chaque sous-indice sur le classement des participants par le SDI, les corrélations entre le SDI et un SDI modifié, correspondant au SDI moins un sous-indice, ont été étudiées. Le calcul des coefficients de Kappa entre le SDI et les SDI modifiés nous ont permis d'estimer les perturbations dans le classement des participants, induites par la suppression d'un sous-indice.

L'étude de la validité du construit du SDI permet d'évaluer si l'indice mesure correctement le concept théorique du phénomène d'intérêt, ici la durabilité des régimes alimentaires. Il n'existe pas de référence quantitative consensuelle d'un régime alimentaire durable. Nous avons alors eu recours à plusieurs propositions de régimes alimentaires durables d'autres institutions pour évaluer la validité du construit du SDI (205,206). Notamment, le Fond mondial pour la nature (WWF) a proposé une assiette LiveWell 2030 adaptée aux spécificités de l'alimentation en France (207). En collaboration avec l'Initiative ECO2, le WWF a également proposé une assiette flexitarienne à faible bilan carbone, saine et abordable (207). Enfin, l'association Solagro a conçu un scénario prospectif des systèmes alimentaires français répondant à plusieurs défis tels que les changements climatiques, les faibles revenus des agriculteurs, et la nécessité d'apporter à tous une alimentation de bonne qualité. Solagro a ainsi proposé une assiette Afterres2050 permettant de répondre à ces enjeux. Notre stratégie a alors consisté à comparer les différences relatives (pour éviter les discordances artificielles dues à des disparités méthodologiques dans la méthode d'évaluation des données sur l'alimentation) des quantités des différents groupes d'aliments entre le cinquième (le plus durable selon le SDI) et le premier (le moins durable selon le SDI) quintile de SDI avec les différences relatives des assiettes durables décrites plus haut et le régime moyen observé en France lors de l'enquête INCA2 (deuxième enquête nationale sur la consommation alimentaire, menée entre 2006 et 2007, dans un échantillon représentatif n=1918). Les assiettes LiveWell2030, flexitarienne et After2050 ont été construites à partir des données de l'enquête INCA2, c'est pour cette raison que nous l'utilisons comme référence.

Analyses statistiques

Le SDI a été calculé pour chaque participant et nous avons classé la population en quintiles de SDI. Des statistiques standards (moyennes avec intervalle de confiance à 95 % ou pourcentages, coefficients de corrélation de Pearson et coefficients pondérés de kappa) ont été mesurées dans les différents quintiles. Les différences de moyennes post hoc entre les quintiles ont été estimées, en utilisant la correction de Dunnett, qui prend en compte les tests multiples.

Pour l'ensemble des tests statistiques, l'erreur de type I a été fixée à 5 %. Toutes les analyses ont été effectuées à l'aide du logiciel SAS® 9.4 (SAS® Institute Inc.).

b/ Résultats

Sélection des indicateurs inclus dans l'indice

De nombreux indicateurs d'évaluation d'au moins un des paramètres de la durabilité des régimes ont été recueillis dans la littérature (109,128,136,174,197–205) et sont présentés dans le Tableau 13.

Leurs principaux liens avec l'alimentation durable sont présentés dans le Tableau 13. En raison de l'indisponibilité de certaines données, nous avons dû renoncer à sept indicateurs. D'autres ont été regroupés en un seul indicateur, comme expliqué dans le Tableau 13. Finalement, sept indicateurs composent le SDI et ont été affectés à l'un des quatre piliers de la durabilité (Tableau 14).

Validité du contenu

Le Tableau 15 présente la répartition de chaque indicateur composant le SDI par quintile. Nous observons que les émissions de gaz à effet de serre, la consommation d'énergie primaire, l'occupation des sols, la balance énergétique, la part du budget alloué à l'alimentation et la contribution des aliments déjà cuisinés dans l'alimentation diminuent avec les quintiles de SDI. Inversement, le PANDiet, la contribution de l'alimentation biologique, le score de fréquentation de lieux d'achat différents des grandes et moyennes surfaces sont plus élevés dans les quintiles les plus durables. On observe également que les corrélations entre chaque sous-indice et le SDI sont fortes. Le sous-indice environnemental est le plus corrélé avec le SDI ($R^2=0.66$).

Les résultats du Tableau 16 présentent les coefficients de Pearson et les coefficients pondérés de kappa entre le SDI et les SDI modifiés par la suppression d'un sous-indice dans le total. Les coefficients de kappa varient de 0,62 à 0,73, indiquant une légère perturbation dans la manière de classer les participants lorsqu'on enlève un des sous-indices.

Tableau 15: SDI (sustainable Diet Index), sous indices, et indicateurs de durabilité par quintile de SDI, et corrélation (coefficient de Pearson)¹, NutriNet-Santé, 2014 (N=29388)

	Q1 (N=5561)	Q2 (N=5966)	Q3 (N=6023)	Q4 (N=5685)	Q5 (N=6153)	Total (N=29388)	Coefficient de corrélation
SDI	8,18 (8,16-8,18)	10,55 (1,53-10,55)	12,12 (12,10-12,12)	13,60 (13,58-13,60)	15,74 (15,72-15,74)	12,10 (12,07-12,13)	
Sous-score de l'environnement	1,89 (1,87-1,92)	2,5 (2,47-2,52)	2,98 (2,95-3)	3,45 (3,42-3,47)	4,1 (4,08-4,12)	3 (2,99-3,01)	0,66
pReCIPE	0,42 (0,42-0,42)	0,33 (0,33-0,34)	0,28 (0,28-0,28)	0,24 (0,23-0,24)	0,18 (0,18-0,19)	0,29 (0,29-0,29)	-0,51
Contribution (en g) des aliments biologiques dans le régime (%)	0,15 (0,14-0,15)	0,22 (0,21-0,23)	0,28 (0,27-0,28)	0,35 (0,34-0,35)	0,48 (0,47-0,48)	0,295 (0,292-0,298)	0,43
Sous-score de nutrition	2,21 (2,18-2,23)	2,69 (2,67-2,72)	3 (2,98-3,03)	3,28 (3,26-3,31)	3,75 (3,72-3,77)	3 (2,99-3,01)	0,53
Différence absolue entre les besoins et les calories déclarées (kcal)	784,68 (772,39-796,97)	673 (661,13-684,87)	633,6 (621,79-645,42)	609,22 (597,06-621,38)	514,6 (502,92-526,29)	640,56 (475,72-646)	-0,21
PANDiet (/100)	61,32 (61,16-61,48)	64,22 (64,06-64,37)	66,41 (66,26-66,56)	68,72 (68,56-68,87)	72,02 (71,87-72,17)	66,62 (66,54-66,7)	0,57
Sous-score d'économie	1,85 (1,82-1,88)	2,62 (2,59-2,65)	3,09 (3,06-3,12)	3,46 (3,42-3,49)	3,9 (3,87-3,93)	3 (2,98-3,02)	0,52
Budget alloué à l'alimentation (%)	17,68 (17,48-17,88)	13,29 (13,10-13,49)	11,24 (11,05-11,44)	9,92 (9,72-10,12)	8,09 (7,90-8,28)	11,96 (11,86-12,06)	-0,41
Sous-score des pratiques alimentaires	2,23 (2,21-2,26)	2,74 (2,71-2,76)	3,06 (3,03-3,08)	3,41 (3,39-3,44)	4 (3,97-4,02)	3,1 (3,09-3,11)	0,57
Lieux d'approvisionnement	0,37 (0,36-0,38)	0,47 (0,46-0,48)	0,53 (0,52-0,54)	0,6 (0,6-0,61)	0,74 (0,73-0,75)	0,55 (0,55-0,55)	0,44
Aliments cuisinés (/3)	1,45 (1,44-1,46)	1,3 (1,29-1,31)	1,19 (1,18-1,2)	1,09 (1,08-1,1)	0,92 (0,91-0,93)	1,19 (1,19-1,19)	-0,44

Q: quintile de SDI

¹ Les valeurs présentées sont les moyennes avec intervalles de confiance à 95% ou des coefficients de corrélation de Pearson

Tableau 16: SDI et SDI modifié par quintile de SDI, étude des corrélations (coefficient de Pearson) et du classement (coefficient pondéré de Kappa), NutriNet-Santé, 2014 (N=29388)

	Q1 (N=5561) (4,00-9,50)	Q2 (N=5966) (9,75-11,25)	Q3 (N=6023) (11,50-12,75)	Q4 (N=5685) (13,00-14,25)	Q5 (N=6153) (14,25-20,00)	Coefficient de corrélation ²	Coefficient pondéré de Kappa ³
SDI	1,78 (1,77-1,79)	3,16 (3,15-3,17)	4,13 (4,11-4,14)	4,98 (4,97-4,99)	6,15 (6,13-6,15)		
SDI sans le sous-indice des pratiques alimentaires	7,93 (7,89-7,97)	10,42 (10,38-10,45)	12,09 (12,05-12,13)	13,58 (13,55-13,62)	15,66 (15,63-15,7)	0,91	0,72
SDI sans le sous-indice économique	8,44 (8,39-8,49)	10,57 (10,53-10,62)	12,05 (12-12,09)	13,53 (13,48-13,57)	15,79 (15,75-15,83)	0,92	0,62
SDI sans le sous-indice nutrition	7,96 (7,92-8)	10,48 (10,44-10,51)	12,16 (12,13-12,2)	13,76 (13,72-13,79)	15,99 (15,96-16,03)	0,85	0,73
SDI sans le sous-indice environnement	8,38 (8,35-8,42)	10,74 (10,7-10,77)	12,2 (12,16-12,23)	13,54 (13,5-13,58)	15,53 (15,49-15,56)	0,92	0,69

Q: quintile de SDI

¹ Valeurs sont des moyennes avec les intervalles de confiance à 95%

² Coefficient de corrélation de Pearson entre l'indice et l'indice transformé (sans sous-indice)

³ Coefficient pondéré de Kappa entre l'indice et l'indice transformé (sans un sous-indice) qui mesure les différences dans la classification des individus dans les quintiles entre le SDI et le SDI transformé

Validité du construit

Le Tableau 17 présente les différences relatives dans la consommation des groupes alimentaires entre le cinquième et le premier quintile de SDI et entre les assiettes durables conçues par d'autres institutions et l'assiette des consommations alimentaires moyennes d'un français, recueillies lors de l'enquête INCA2.

Tableau 17: Différence relative de la consommation des groupes d'aliments, entre les quintiles de SDI extrêmes, NutriNet-Santé 2014 (N=29388) et entre les assiettes de différents scénarios de transition vers des régimes plus durables et la moyenne des consommations (INCA 2)

	Différence relative entre les Q5 et Q1 de SDI		Différence relative entre Flex ¹ et INCA2 ²		Différence relative entre Afterres ³ et INCA2 ²		Différence relative entre Livewell ⁴ et INCA2 ²	
Boissons alcoolisées	-34,56%	↓	-51,55%	↓	-27,00%	↓	-26,36%	↓
Fruits et compotes	26,70%	↑	-7,89%		35,73%	↑	21,19%	↑
Légumes	21,83%	↑	66,55%	↑	22,04%	↑	81,62%	↑
Produits à base de céréales	-12,86%	↓	3,88%		85,89%	↑	60,20%	↑
Légumineuses, noix, et graines	65,00%	↑	1602%	↑	231%	↑	626%	↑
Racines et tubercules	-49,04%	↓	-5,66%		-15,95%	↓	32,08%	↑
Œufs	-16,49%	↓	161,44%	↑	-28,10%	↓	30,72%	↑
Viandes (bœufs, porcs et agneaux sans les charcuteries)	-74,07%	↓	-77,87%	↓	-45,67%	↓	-63,78%	↓
Volailles	-56,98%	↓	-2,82%		-9,09%		0,31%	
Charcuteries	-68,54%	↓	-56,27%	↓	MD		-50,44%	↓
Lait et produits laitiers (sans les fromages)	-27,67%	↓	-9,31%		-51,07%	↓	6,80%	
Fromages	-58,13%	↓	-7,19%		-64,07%	↓	46,71%	↑
Beurres, huiles et autres matières grasses	4,76%		33,59%	↑	-4,58%		60,31%	↑
Sucreries	-27,39%	↓	-65,78%	↓	-27,76%	↓	-54,37%	↓
Poissons et fruits de mer	-13,21%	↓	-3,23%		-74,19%	↓	48,39%	↑
Plats composés	-49,85%	↓	1,10%		MD		-96,32%	↓
Snacks, desserts, et autres	-42,80%	↓	-80,48%	↓	MD		-69,63%	↓
Jus de fruits, de légumes et soupes	-9,53%	↓	-91,05%	↓	MD		-55,23%	↓

Q : quintile de SDI, MD : Données manquantes

¹Flex : assiettes flexitariennes du WWF et de ECO₂

²INCA2 : Enquête nationale sur les consommations alimentaires individuelles (2006-2007 en France)

³Afterres2050 : Assiettes développées par le scénario Afterres2050 de Solagro

⁴Livewell 2030 : assiette du WWF

↓ Diminution de 15% ou plus

↑ Augmentation de 15% ou plus

Plus le SDI est élevé plus les consommations d'aliments d'origine animale (viandes et viandes transformées, produits laitiers et lait, fruits de mer et poisson), des boissons alcoolisées, des jus et soupes et des boissons sucrées sont faibles. Des associations comparables sont observées pour les

viandes dans les assiettes durables d'autres institutions, alors que des disparités sont observées dans les consommations de poissons, d'œufs et de produits laitiers. En effet, les consommations de poissons et d'œufs ont été considérablement réduites dans l'assiette Afterres2050 alors qu'elles ont été augmentées dans l'assiette Livewell 2030. La consommation de produits laitiers n'augmente que dans l'assiette Livewell 2030.

Un SDI élevé était associé à une consommation élevée de fruits, de légumes et de légumineuses, mais les différences entre le cinquième et le premier quintile étaient moins marquées que celles observées entre les assiettes durables et l'assiette INCA2.

Caractéristiques sociodémographiques des participants à travers les quintiles

Le Tableau 18 présente les caractéristiques sociodémographiques et de modes de vie entre les quintiles de SDI. Tous les facteurs sont associés de façon significative au SDI. Les participants ayant les comportements alimentaires les plus durables selon le SDI (cinquième quintile) présentent souvent des caractéristiques socio-économiques et de modes de vie plus favorables. Les pourcentages de femmes et de végétariens sont également plus importants dans le quatrième et cinquième quintile de SDI.

Tableau 18: Caractéristiques sociodémographiques et de modes de vie entre quintiles de SDI¹ (Sustainable Diet Index), NutriNet-Santé, 2014 (N=29388)

	Q1 (N=5534) (0,00-2,50)	Q2 (N=5978) (2,75-3,50)	Q3 (N=6930) (3,75-4,50)	Q4 (N=4664) (4,75-5,25)	Q5 (N=6282) (5,50-8,00)	P ²
Sexe						<0,0001
Femme	61,54	69,53	75,11	81,07	85,76	
Apport calorique (kcal/j)	2402 (2387-2418)	2066 (2051-2081)	1929 (1914-1944)	1835 (1820-1851)	1798 (1783-1812)	<0,0001
Revenu mensuel par unité de consommation						<0,0001
Refuse de déclarer	4,06	5,75	6,28	7,25	6,91	
<1200 euros	26,09	14,47	9,33	6,28	2,65	
1200-1800 euros	37,33	29,62	22,93	17,1	9,48	
1800-2700 euros	22,93	28,95	30,73	30,2	24,23	
>2700 euros	9,58	21,22	30,73	39,17	56,74	
Qualification scolaire						<0,0001
Inférieur au baccalauréat	30,95	23,85	20,07	18,4	13,78	
Équivalent au baccalauréat	17,44	15,24	14,28	13,81	12,55	
Post-baccalauréat	51,61	60,91	65,65	67,79	73,67	
Taille d'agglomération						<0,0001
Communautés rurales	24,4	23,4	22,03	21,34	21,29	
Unité urbaine <20 000 habitants	19,46	18,35	17,98	19,17	18,38	
Unité urbaine entre 20 000 et 200 000 habitants	16,62	15,54	16,04	13,98	14,42	
Unité urbaine ≥ 200 000 habitants	39,53	42,71	43,95	45,51	45,91	

Consommation d'alcool						<0,0001
Abstinent	5,7	5,16	4,96	5	6,21	
Consommation <14g/j	69,0	72,8	73,9	76,8	78,1	
Consommation ≥14g/j	25,3	22,0	21,1	18,2	15,7	
Activité physique						<0,0001
Données manquantes	12,64	10,79	9,98	10,48	10,14	
>60 min/j	33,99	34,88	33,82	33,54	31,89	
30-60 min/j	30,68	33,57	37,11	38,28	41,69	
<30 min/j	22,69	20,75	19,09	17,7	16,28	
Consommation de tabac						0,0689
Ancien fumeur	41,22	39,84	39,98	40,63	40,83	
Fumeur occasionnel	2,9	3,34	3,67	3,29	3,41	
Fumeur	10,65	8,1	7,37	6,44	4,96	
Non-fumeur	45,24	48,73	48,98	49,64	50,8	
Régime						<0,0001
Omnivore	99,69	98,81	97,28	95,32	92,1	
Végétalien	0,04	0,28	0,95	1,69	2,58	
Végétarien	0,27	0,91	1,78	2,99	5,31	
Indice de masse corporelle (IMC)						<0,0001
IMC<18,50 kg/m ²	2,81	3,25	4,12	5,22	7,83	
18,50-24,99 kg/m ²	46,3	56,79	61,18	66,37	73,67	
25,00-29,99 kg/m ²	31,95	27,84	25,73	21,79	15,15	
IMC≥30,00 kg/m ²	18,94	12,12	8,97	6,61	3,35	
Âge						<0,0001
Âge<25	2,9	2,35	1,76	1,55	0,99	
25≤Âge<35	11,47	10,95	11,59	11,19	9,22	
35≤Âge<50	27,3	24	22,85	20,93	20,71	
50≤Âge<65	35,08	36,84	37,42	40,25	42,65	
Âgé≥65	23,25	25,86	26,38	26,09	26,44	

Q: quintile de SDI

¹ Les valeurs présentées sont des pourcentages

² P fait référence au chi² test

c/Interprétation des principaux résultats

La présente étude décrit un nouvel indice, appelé SDI, d'évaluation de la durabilité des régimes alimentaires au niveau individuel. Cet indice est composé de quatre sous-indices de même importance reflétant les quatre domaines de la durabilité des régimes alimentaires : les aspects environnementaux, nutritionnels, économiques et de pratiques alimentaires (96).

L'évaluation de la validité du contenu basée sur l'étude des corrélations et de la concordance entre l'indice global des indices modifiés a montré que tous les sous-indices et leurs indicateurs contribuent indépendamment au SDI global, justifiant leur inclusion dans l'indice. Le sous-indice environnemental était le plus corrélé au SDI. Seule la différence absolue entre la consommation et les besoins énergétiques est peu corrélée avec le SDI. En effet, les participants peuvent obtenir peu

de points pour cet indicateur, car leur régime apporte peu ou au contraire trop de calories. Des études récentes ont montré qu'une alimentation apportant peu de calories est souvent associée avec un impact environnemental moindre (notamment par rapport aux émissions de gaz à effet de serre ou l'utilisation des terres) (141). Ainsi, le conflit entre les indicateurs environnementaux et économiques et l'indicateur de la balance énergétique, illustré par de probables diminutions des impacts sur l'environnement et du prix des régimes lorsque l'apport énergétique est réduit l'absence, pourrait expliquer pourquoi il n'existe qu'une faible corrélation entre l'indicateur de la balance énergétique et le SDI. De plus, les différences de corrélations entre les indicateurs et le SDI s'expliquent par les différences structurelles entre indicateurs et sous-indices. Aujourd'hui, il n'existe aucune méthode permettant d'imposer que chaque indicateur compris dans un indice soit corrélé de la même manière (208,209).

Le dernier test effectué (étude des coefficients de kappa entre le SDI et des SDI modifiés) pour évaluer la validité du contenu a montré que tous les sous-indices ont une influence sur le classement des participants. En effet, la suppression d'un sous-indice du SDI perturbe le classement des participants avec une force comparable, les coefficients de kappa étant proches. Il est en effet intéressant de noter qu'aucun sous-indice ne semble jouer un rôle prédominant dans le classement des participants. Finalement, les résultats de la validité du contenu indiquent un relativement bon équilibre entre les sous-indices.

L'évaluation de la validité du construit était relativement plus subjective puisqu'une référence d'assiette durable reconnue faisait défaut. Les nouveaux repères alimentaires français intégrant la durabilité de l'alimentation n'étaient pas publiés au moment de l'étude. Ainsi, pour faire face à ce manque et fournir des éléments de validité externes, notre stratégie a consisté à comparer les différences relatives de consommation des groupes alimentaires entre les différents niveaux d'alimentation durable selon le SDI (différence entre quintiles extrêmes) avec des assiettes de transition vers une alimentation plus durable conçues par certaines organisations et comparées à l'alimentation française moyenne évaluée lors de l'enquête INCA2. Ces comparaisons ont montré des résultats globalement cohérents : les changements en termes de consommation de groupes alimentaires nécessaires pour parvenir à un régime alimentaire plus durable, correspondant à un SDI élevé et ceux proposés dans les assiettes durables conçues par d'autres organisations et indépendamment de notre travail, étaient comparables pour la plupart des groupes d'aliments. En particulier pour les groupes d'aliments dont la production est connue pour être à l'origine d'émissions de gaz à effet de serre particulièrement élevées, comme la viande. Au contraire, la

consommation de fruits et légumes est associée positivement avec le SDI tout comme avec les autres assiettes durables proposées.

Les résultats sont également en cohérence avec la classification des aliments proposée par Van Dooren *et al.* (210). Cette classification des aliments comporte trois classes allant du rouge au vert. La classe est déterminée en fonction d'un score de richesse en nutriment de l'aliment (le SNRF) et de l'impact sur les climats de la production de l'aliment. Les aliments dont la consommation est augmentée dans le cinquième quintile par rapport au premier quintile de notre étude sont ceux de la classe verte, tandis que ceux dont la consommation a diminué sont dans la classe rouge. Aussi, la production des viandes de ruminants est à l'origine des plus forts impacts sur l'environnement, au moins sur les indicateurs retenus ici, que la production de viandes de porc ou de volailles (6,130,141). Ceci pourrait expliquer pourquoi les différences relatives de consommation de viandes de porc ou de volailles entre le premier et le cinquième quintile sont inférieures à celles de la viande rouge.

Enfin, il convient de noter que pour certains groupes d'aliments, tels que les poissons et fruits de mer, les œufs et les produits laitiers, aucun consensus ne se dégage entre les assiettes proposées par d'autres organisations (Solagro ou le WWF). Une des raisons expliquant l'absence de consensus serait liée aux différences dans les choix méthodologiques et de définition d'un régime alimentaire durable. En effet, prioriser la nutrition peut induire une augmentation de la consommation de poissons ou de fruits de mer, alors que des considérations toxicologiques ou sur l'épuisement des ressources en poissons auraient plutôt tendance à préconiser une consommation modérée.

Nos résultats ont également montré que tous les facteurs sociodémographiques ou de mode de vie sont associés aux quintiles de SDI. Les participants ayant les régimes alimentaires les plus durables (cinquième quintile) sont plus susceptibles d'être socialement favorisés (revenu élevé, diplômés), vivant en ville et avec des modes de vie sains (faible consommation de tabac, consommation modérée d'alcool et peu sédentaire). Ainsi, il est probable que pour une partie de la population, les régimes alimentaires sains et respectueux de l'environnement sont trop chers, relativement à leurs revenus. Certains peuvent peut-être aussi rencontrer des difficultés d'accès géographique à une alimentation durable. La mise en œuvre de nouvelles politiques publiques sur l'accessibilité des régimes alimentaires durables pour l'ensemble de la population française pourrait ainsi être particulièrement bénéfique.

Comme pour le développement d'autres indices développés selon une méthode a priori, l'élaboration du SDI présente plusieurs limites méthodologiques (209). En particulier, le choix de

l'échelle des points de 1 à 5 est arbitraire et a un effet sur l'indice. Nous avons choisi cette échelle sur 5 afin de discriminer suffisamment les participants sans avoir trop de catégories. Afin de refléter l'absence de hiérarchie entre les domaines de la durabilité des régimes, nous avons choisi de donner la même pondération aux quatre sous-indices. Toutefois, comme le sous-indice économique contient uniquement un indicateur alors que les autres en contiennent deux, les indicateurs constituant l'indice n'ont pas le même poids. À l'avenir et avec davantage de données et d'indicateurs, il serait intéressant de rééquilibrer le nombre d'indicateurs dans chaque sous-indice. Des indicateurs comme l'empreinte sur l'eau, le commerce équitable ou l'indice de fréquence de traitement des cultures seraient particulièrement intéressants à inclure dans le SDI. L'ajout d'autres indicateurs permettrait d'améliorer la qualité de l'indice et de considérer de potentiels conflits entre composantes. En effet, comme le souligne Gustafson *et al.*, conseiller une augmentation de la consommation de fruits, dans certains contextes, peut aussi promouvoir l'intensification de l'épuisement des ressources en eau ou la détérioration des conditions de travail des personnes vulnérables dans les champs (109). Il serait également pertinent d'affiner la précision de l'évaluation de certains indicateurs déjà compris dans le SDI, en particulier celui évaluant la consommation d'aliments préparés. La classification de certains indicateurs dans un domaine peut être débattue. Par exemple, nous avons classé l'indicateur sur la diversité des lieux d'achat autre que les supermarchés dans le sous-indice des pratiques alimentaires. Il aurait pu également être classé au sein du sous-indice économique, car certaines implications d'un approvisionnement diversifié ont une portée économique.

Notre objectif étant d'évaluer la durabilité de l'alimentation au niveau individuel, ce choix nous a conduits à certains choix. Par exemple, pour évaluer l'accessibilité économique de nos régimes, nous avons utilisé comme indicateur la part du revenu allouée à l'alimentation. Plus cette part du revenu est faible, plus le régime est considéré comme abordable. Cependant, au niveau sociétal, cette faible contribution du revenu à l'alimentation peut représenter une menace pour la viabilité économique des systèmes de production durables. Ou bien, il faudrait que les coûts monétaires réels d'une production alimentaire durable soient assurés différemment, par exemple avec des politiques de subventions. L'indicateur du budget alloué à l'alimentation nous a semblé plus proche de la notion d'accessibilité économique de la définition de la FAO, que le prix du régime, qui ne tient pas compte des ressources individuelles.

L'évaluation de la validité du construit est basée sur des travaux récents d'autres institutions, par manque de référence. En effet, les résultats des recherches sur l'alimentation durable sont encore peu nombreux, car le domaine est assez récent et repose sur des hypothèses qui n'ont pas encore été correctement validées. Enfin, la construction du SDI a été menée dans un contexte français, à

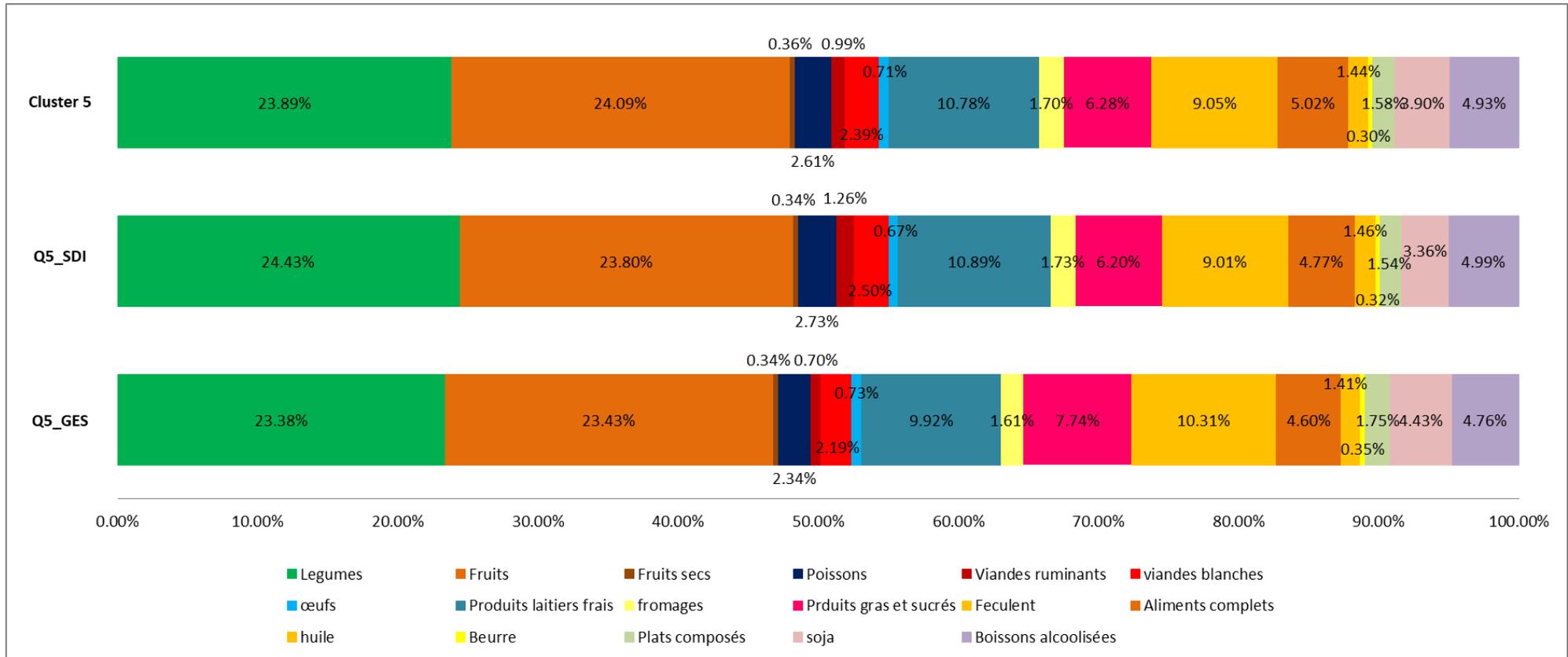
partir de données provenant d'une large cohorte, mais constituée de participants avec des caractéristiques spécifiques, notamment concernant les caractéristiques sociodémographiques et les régimes alimentaires (177,211–213). Cette situation aurait pu réduire la portée du SDI, à cause du manque de certains comportements alimentaires, mais elle permet aussi d'observer des comportements alimentaires plus marqués. Le SDI a été construit avec quelques indicateurs spécifiques à la population française, comme le PANDiet qui est basé sur les recommandations françaises en matière d'apports nutritionnels. Néanmoins, de légères modifications pourraient rendre le SDI approprié pour évaluer la durabilité de l'alimentation dans d'autres régions occidentales.

5) Discussion et comparaison des méthodes

Finalement, par la mise en place de trois approches, nous avons identifié des comportements alimentaires plus bénéfiques pour la durabilité, au moins pour certaines composantes. L'objectif de ce chapitre est de comparer ces approches et de discuter les différences observées. Nous comparerons, en particulier, la structure des régimes des groupes de participants ayant les comportements alimentaires les plus durables selon les critères évalués.

Sur la Figure 13 ci-dessous, nous avons présenté les contributions (en % de masse du régime) des principaux groupes d'aliments pour les participants du quintile de régimes dont la production émet le moins de gaz à effet de serre, pour les participants du cinquième quintile de SDI et le cluster 5 qui représentait les groupes de participants dont les régimes présentent le meilleur compromis entre les indicateurs de durabilité sélectionnés pour les deux études.

Cette figure met en évidence une structure de régimes très proche entre les trois régimes durables obtenus par trois approches différentes dans la cohorte NutriNet-Santé. En particulier, les structures du régime moyen du cinquième quintile de SDI et celle des régimes des participants dans le cinquième cluster sont presque identiques. Le régime moyen des participants dans le quintile avec les plus faibles émissions de gaz à effet de serre diffère légèrement. En effet, nous notons une plus faible contribution des fruits et légumes et de la viande (blanche et de ruminants) au bénéfice d'une plus forte contribution des aliments gras et sucrés et des féculents dans le régime moyen le plus protecteur du climat. Ceci peut s'expliquer par le fait que la production de viandes et de la plupart des fruits et légumes sont à l'origine de plus d'émissions de gaz à effet de serre, comparativement à une bonne partie des aliments gras et sucrés et des féculents.



Cluster 5 : groupes des participants présentant le meilleur compromis lors de la phase exploratoire

Q5_SDI : quintile des participants ayant obtenu les SDI (indice d'évaluation de la durabilité) les plus élevés

Q5_GES : quintile des participants dont la production du régime émet le moins de gaz à effet de serre

Figure 13: Contribution (en% de g) des groupes d'aliments dans les trois meilleurs régimes obtenus par les approches mises en œuvre lors de la thèse

La contribution des aliments issus de l'agriculture biologique est plus élevée dans le cinquième quintile de SDI (48%), que dans le cluster 5 (43%) et dans le cinquième quintile d'émissions de gaz à effet de serre (42%). La raison peut-être que dans l'approche cluster, le cluster 6 regroupe aussi des personnes dont le régime a une bonne qualité nutritionnelle, une forte proportion d'aliments biologiques et moins d'impacts sur l'environnement, mais il se distingue des régimes du cluster 5 par sa plus faible accessibilité économique.

Dans la suite de ce travail de thèse, nous utiliserons le SDI comme variable d'exposition. En effet les scores a priori permettent de travailler dans des populations différentes et sont moins soumis aux populations d'étude.

V Étude des associations entre des comportements alimentaires plus durables et les événements de santé

Dans cette seconde partie de résultats, nous présentons les travaux portant sur les associations entre le SDI (score d'évaluation de la durabilité des régimes à l'échelle individuelle) et le statut pondéral puis avec les cancers et les maladies cardiovasculaires.

1) Associations entre le SDI et l'évolution de la masse corporelle et la survenue de l'obésité et du surpoids

L'objectif de ce travail consistait à étudier les associations entre le SDI, l'évolution de la masse corporelle et la survenue de l'obésité ou du surpoids au sein d'un sous-échantillon de participants de la cohorte NutriNet-Santé ayant répondu aux questionnaires du projet BioNutriNet.

a/ Population d'étude et méthodes appliquées dans ce travail

Population d'étude

Parmi les 37 685 participants qui ont rempli le questionnaire Org-FFQ, nous avons exclu ceux qui ont été identifiés comme sous-déclarants ou sur-déclarants (N=2109). Nous avons également exclu les participants dont les principales covariables manquées, à l'exception du niveau d'activité physique (N=391), qui ne vivaient pas en France métropolitaine (N=743), dont les données anthropométriques (N=3396) ou utiles au calcul du SDI (N=4452) manquées à l'inclusion, ceux qui pratiquaient des régimes amaigrissants au moment de la collecte des données de consommation alimentaire (N=6299), et les participants avec un diagnostic de cancer à l'inclusion, une chirurgie bariatrique, des troubles du comportement alimentaire, du cushing ou une obésité à l'inclusion (N=4,669). Notre échantillon final était composé de 15 626 participants. Nous avons calculé le SDI pour chacun des participants puis divisé l'échantillon en quintile sexe spécifique de SDI.

Méthodes statistiques

Les caractéristiques sociodémographiques et de modes de vie ont été évaluées et comparées par quintile de SDI. Les pourcentages par quintile de SDI sont présentés dans les tableaux de résultats. De plus, les moyennes et écarts-types des quantités consommées de 17 groupes d'aliments ajustées sur l'apport énergétique selon la méthode des résidus (155) ont été calculés et présentés par quintiles. Les P-valeurs font référence aux tests de contraste linéaire ou aux tests du χ^2 de Mantel-Haenszel. La multiplicité des tests a été corrigée en utilisant une correction de Dunnett.

Les associations entre les quintiles de SDI et les mesures répétées de la masse corporelle des participants ont été évaluées par des modèles mixtes avec un effet aléatoire sur l'intercept et le temps et un effet répété sur les individus. Nous avons testé deux modèles : un modèle ajusté sur l'âge et la taille des individus (modèle 1) et un modèle ajusté sur le sexe, l'âge, la taille, le niveau d'activité physique, la consommation de tabac, la consommation d'alcool, le revenu mensuel par unité de consommation, le diplôme obtenu, la composition du ménage, l'apport énergétique sans alcool, le statut ménopausique et la situation vis-à-vis de l'emploi au moment du recueil des données alimentaires (modèle 2). Des imputations multiples ont été utilisées pour compléter les données manquantes de l'activité physique dans le modèle 2 (10 répétitions). Le cinquième quintile (Q5), qui représente le groupe avec les participants ayant les comportements alimentaires les plus durables, a été considéré comme la référence pour tous les modèles. Les coefficients β pour les quintiles représentent les différences de masse corporelle au départ entre les quintiles. Le coefficient β du temps indique l'évolution moyenne de la masse corporelle pour la référence. Enfin, un coefficient β positif pour l'interaction entre le SDI et un quintile indique la différence de gain (si le β est positif) ou de perte (si le β est négatif) de masse corporelle dans le quintile par rapport au quintile de référence.

Dans une seconde série d'analyses, nous avons utilisé le modèle des risques proportionnels de Cox utilisant l'âge comme échelle de temps pour estimer le risque de survenue de l'obésité au sein de l'échantillon et du surpoids dans un sous-échantillon après exclusion des participants avec un surpoids à l'inclusion (N = 12 079). Les participants ont contribué au temps-personne des modèles de Cox jusqu'à la date d'apparition du surpoids ou de l'obésité pour les cas (définie comme la date médiane entre la date du questionnaire de déclaration de l'embonpoint ou de l'obésité, et la date du questionnaire précédent) ou la date du dernier questionnaire anthropométrique complété pour les non-cas. Nous avons confirmé l'hypothèse de proportionnalité des risques 1) en utilisant graphiquement la probabilité de survie log-log dans le temps et 2) par l'étude de la distribution des résidus de Schoenfeld. De plus, la log-linéarité pour les covariables continues a été validée en utilisant les résidus de la Martingale. Un premier modèle (modèle 1) a été ajusté sur le sexe et la taille des participants ; le modèle 2 a été ajusté sur l'activité physique, le tabagisme, le niveau de consommation d'alcool, l'apport énergétique sans alcool, le revenu mensuel par unité de consommation, le niveau d'étude, la situation professionnelle, le nombre de personnes dans le ménage, la ménopause ; et enfin le modèle 3 a été ajusté en plus sur l'indice de masse corporelle au début de l'étude. Nous avons également analysé l'association dose-réponse du SDI en utilisant une fonction spline cubique restreinte (RCS) au moyen de la macro SAS® développée et publiée par Desquilbet & Mariotti (214).

L'erreur de type I bilatérale a été fixée à 5 % pour tous les tests statistiques. Le logiciel SAS® 9.4 (SAS® Institute Inc., Cary, NC, USA) a été utilisé pour effectuer les analyses.

b/ Résultats

L'échantillon était composé de 15 626 participants qui en moyenne étaient plus âgés, plus souvent des hommes, non-fumeurs, avec un revenu plus élevé, mais un niveau d'étude plus faible que l'ensemble des participants présents dans la cohorte en 2014. Nous avons plus de participants avec du surpoids (sans obésité) à l'inclusion que dans l'ensemble de la cohorte.

Le suivi médian pour ces analyses était de près de 3 ans et nous avons un nombre de personnes-années de 33 306 (analyse du risque d'obésité). Le Tableau 19 décrit les caractéristiques sociodémographiques et de mode de vie par quintile sexe spécifique de SDI. Nous observons que le SDI est positivement et linéairement associé à la proportion de participants ayant un diplôme d'étude supérieure au baccalauréat, un revenu mensuel élevé et un niveau d'activité physique moyen tandis que la proportion de fumeurs actuels ou de grands consommateurs d'alcool est négativement associée au SDI. Au départ, les personnes avec du surpoids (IMC : 25,0-29,99 kg/m²) étaient plus susceptibles de se trouver dans les premiers quintiles.

En ce qui concerne les consommations alimentaires, le Tableau 20 montre que l'apport énergétique quotidien est plus élevé pour les participants du premier quintile. La consommation de tous les types de viande est associée négativement au SDI. Une tendance similaire a été observée pour les produits laitiers, les fromages, les plats composés, les produits sucrés et gras et les sodas. Les participants dans le quatrième et cinquième quintile de SDI présentent une consommation plus importante de produits céréaliers bruts, de fruits et légumes, de soja, de légumineuses et de noix.

Tableau 19: Caractéristiques sociodémographiques et de mode de vie au début du suivi par quintile sexe spécifique de SDI (Q), NutriNet-Santé¹ (N=20298), 2014, France

	Q1 (N=3098)	Q2 (N=3104)	Q3 (N=3294)	Q4 (N=2983)	Q5 (N=3147)	p	P ² chisq
SDI (Moyen)							
Homme	7,7	9,9	11,4	12,8	15		
Femme	8,8	11,3	12,8	14,1	16,2		
Sexe						0,49	<0,0001
Femme	71,98	71,95	67,75	73,49	72,10		
Âgé						<0,0001	<0,0001
Âge<25	3,03	1,91	1,14	1,03	0,57		
25≤Âge<35	11,17	11,17	9,42	9,83	7,47		
35≤Âge<50	28,28	23,86	20,48	20,10	19,03		
50≤Âge<65	35,93	36,07	39,93	40,27	43,47		
Âge≥65	21,59	26,99	29,03	28,77	29,46		
Qualification scolaire						<0,0001	<0,0001
Inférieur au baccalauréat	27,55	21,81	20,11	18,50	13,06		
Équivalent au baccalauréat	16,58	14,63	14,45	13,26	12,36		
Post-baccalauréat	55,88	63,56	65,43	68,24	74,58		
Revenu par unité de consommation						<0,0001	<0,0001
À refuser de déclarer	4,87	5,68	6,00	6,25	5,40		
<1200 euros	23,31	12,05	7,91	4,86	2,03		
1200-1800 euros	37,57	28,48	19,38	15,21	6,96		
1800-2700 euros	24,05	30,54	31,18	29,83	23,36		
>2700 euros	10,20	23,25	35,53	43,85	62,25		
Ménage						<0,0001	<0,0001
Vie avec un partenaire	72,66	74,98	76,03	77,32	78,49		
Activité physique³						0,03	<0,0001
Importante (>60min/j)	40,26	39,63	40,67	39,81	37,76		
Moyenne (30-60min/j)	37,41	38,68	41,74	42,28	45,42		
Faible (<30min/j)	22,33	21,68	17,59	17,91	16,82		
Statut anthropométrique (IMC)						<0,0001	<0,0001
IMC<18.5 kg/m ²	5,23	5,22	4,43	6,19	7,88		
18.5-24.99 kg/m ²	64,95	68,79	71,47	74,45	79,41		
25-29.99kg/m ²	29,83	25,99	24,10	19,36	12,71		
≥30kg/m ²						<0,0001	<0,0001
Consommation de tabac	13,98	11,60	9,99	10,44	7,66		
Fumeur						<0,0001	<0,0001
Consommation d'alcool	4,97	4,10	4,39	5,25	5,43		
Abstinent	71,53	73,56	72,11	74,16	76,07		
Consommation<14g/j	23,50	22,34	23,50	20,59	18,49		
Consommation élevée≥14g/j	22,90	21,80	22,41	21,28	18,69		

¹ Les valeurs présentées sont des pourcentages

² Les P-valeurs sont estimées à partir des tests du χ^2 de Mantel-Haenszel

³ Comme certaines questions sont optionnelles, nous avons des données manquantes pour 2138 participants

Tableau 20: Consommations moyennes des groupes d'aliments par quintile de SDI¹ (N=20295), NutriNet-Santé, 2014, France

	Q1 (N=3098)	Q2 (N=3104)	Q3 (N=3294)	Q4 (N=2983)	Q5 (N=3147)	P tendance ²
Apport énergétique ³ (kcal/j)	2345 (2324-2366)	2039 (2019-2060)	1948 (1927-1969)	1855 (1835-1876)	1842 (1821-1863)	<0,0001
Poisson (g/j)	41,59 (40,12-43,06)	44,16 (42,77-45,54)	46,87 (45,41-48,32)	47,12 (45,68-48,55)	46,71 (45,29-48,14)	<0,0001
Viande de ruminants (g/j)	65,97 (64,66-67,28)	48,09 (46,86-49,32)	41,15 (39,85-42,44)	32,14 (30,87-33,42)	22,79 (21,52-24,05)	<0,0001
Autres viandes (g/j)	95,02 (93,52-96,51)	73,75 (72,35-75,16)	63,15 (61,67-64,63)	53,43 (51,97-54,88)	41,75 (40,3-43,2)	<0,0001
Œufs (g/j)	10,73 (10,34-11,13)	11,37 (11-11,74)	11,02 (10,63-11,41)	11,08 (10,7-11,46)	10,88 (10,5-11,26)	0,19
Produits laitiers (g/j)	215,72 (208,81- 222,63)	204,03 (197,53- 210,52)	200,29 (193,46- 207,12)	204,08 (197,35- 210,81)	177,22 (170,52- 183,91)	<0,0001
Fromages (g/j)	51,51 (50,04-52,99)	46,13 (44,74-47,51)	41,36 (39,9-42,81)	37,5 (36,06-38,94)	32,63 (31,2-34,05)	<0,0001
Aliments composés (g/j)	40,66 (39,4-41,92)	36,95 (35,77-38,14)	32,05 (30,81-33,3)	30,38 (29,15-31,6)	26,27 (25,05-27,49)	<0,0001
Aliments gras et/ou sucrés (g/j)	78,47 (76,75-80,19)	74,57 (72,95-76,19)	70,89 (69,19-72,59)	68,83 (67,15-70,51)	65,02 (63,35-66,69)	<0,0001
Sauces (g/j)	15,77 (15,24-16,3)	16,53 (16,03-17,03)	16,53 (16-17,06)	17,34 (16,83-17,86)	18,44 (17,92-18,96)	<0,0001
Matières grasses (g/j)	26,24 (25,63-26,84)	28,74 (28,17-29,31)	29,89 (29,29-30,49)	31,92 (31,33-32,51)	33,09 (32,5-33,68)	<0,0001
Féculents raffinés (g/j)	164,89 (161,53- 168,24)	153,53 (150,38- 156,68)	150,48 (147,17- 153,8)	140 (136,73-143,26)	126,28 (123,04- 129,53)	<0,0001
Aliments céréaliers complets (g/j)	30,2 (27,69-32,72)	49,36 (47-51,73)	58,5 (56,01-60,98)	69,03 (66,58-71,49)	87,63 (85,19-90,06)	<0,0001
Légumineuses et noix (g/j)	14,13 (13,01-15,25)	19,92 (18,87-20,97)	23,14 (22,04-24,25)	27,38 (26,29-28,46)	35,38 (34,3-36,47)	<0,0001
Fruits et légumes (g/j)	569,7 (556,31-583,09)	674,68 (662,09- 687,27)	737,61 (724,38- 750,85)	795,93 (782,89- 808,98)	877,15 (864,17- 890,12)	<0,0001
Aliments avec soja (g/j)	6,85 (3,29-10,41)	19,73 (16,39-23,08)	32,72 (29,2-36,24)	43,29 (39,82-46,76)	61,09 (57,64-64,54)	<0,0001
Soda (ml/j)	53,18 (49,96-56,41)	41,37 (38,34-44,41)	32,67 (29,48-35,86)	31,65 (28,51-34,8)	20,95 (17,82-24,08)	<0,0001
Boissons alcoolisées (ml/j)	93,73 (88,71-98,76)	107,72 (102,99- 112,44)	114,32 (109,36- 119,29)	109,18 (104,29- 114,08)	100,02 (95,15- 104,89)	0,26

Poisson : Poissons et fruits de mer, Viande de ruminants : bœuf, veau et agneau, autres viandes : porc, volaille et charcuterie, Produits laitiers : lait, yaourt, et autres desserts à base de lait et Matières grasses : huile, beurre et autres matières grasses

¹ Les valeurs présentées sont des moyennes ajustées sur l'apport énergétique avec la méthode des résidus et leur intervalle de confiance 95%

² Basé sur les tests de contrastes linéaires

³ Ces moyennes ne sont pas ajustées

Au cours du suivi, 86,15% de l'échantillon avait reporté plus de 3 fois leurs données anthropométriques. Le Tableau 21 montre que la masse corporelle moyenne au début des analyses diminue significativement avec les quintiles de SDI. Les associations entre le SDI et l'évolution de la masse corporelle au fil du temps sont également présentées dans le Tableau 21. Dans les deux modèles, la masse corporelle demeure à peu près constante dans le temps au sein du quintile de référence (Q5), les coefficients β du temps étant proches de 0. Les interactions entre le temps et les quintiles 2, 3 et 4 ne sont pas significatives, ce qui signifie que les modifications de masse corporelle

au cours du temps des participants dans ces quintiles ne sont pas différentes du Q5 (référence). Cependant, l'interaction entre le temps et le Q1 est significative et le signe du β est positif. Ainsi, uniquement la population du premier quintile (Q1) présente une augmentation significative de la masse corporelle moyenne, d'environ 160g par an.

Tableau 21: Association entre évolution de la masse corporelle et quintile sexe spécifique (Q) de SDI, NutriNet-Santé (N=20295), 2014-2018, France

	β (Intervalle de confiance 95%)	Pr> t	P tendance
Modèle 1¹			
<i>Temps (gain de masse par an pour la référence)</i>			<0,0001
Temps	0,017 (-0,03-0,06)	0,43	
<i>Quintile de SDI (test des différences de masse corporelle au début du suivi)</i>			<0,0001
Q1 [SDI médiane : 8.50/20]	4,46 (4,06-4,86)	<0,0001	
Q2 [SDI médiane : 10.75/20]	3,44 (3,05-3,83)	<0,0001	
Q3 [SDI médiane : 12.25/20]	2,91 (2,51-3,31)	<0,0001	
Q4 [SDI médiane : 13.75/20]	1,60 (1,20-1,99)	<0,0001	
Q5 (ref) [SDI médiane : 15.75/20]	-		
<i>Interaction SDI*temps (gain de masse additionnel par rapport à la référence)</i>			<0,0001
Temps*Q1	0,16 (0,09-0,22)	<0,0001	
Temps*Q2	0,06 (0,00-0,12)	0,049	
Temps*Q3	0,005 (-0,06-0,07)	0,884	
Temps*Q4	0,03 (-0,03-0,10)	0,273	
Temps*Q5 (ref)	-		
Modèle 2²			
<i>Temps (gain de masse par an pour la référence)</i>			<0,0001
Temps	0,018 (-0,03-0,06)	0,42	
<i>Quintile de SDI (test des différences de masse corporelle au début du suivi)</i>			<0,0001
Q1 [SDI médiane : 8.50/20]	4,66 (4,21-5,10)	<0,0001	
Q2 [SDI médiane : 10.75/20]	3,60 (3,20-4,01)	<0,0001	
Q3 [SDI médiane : 12.25/20]	2,84 (2,44-3,24)	<0,0001	
Q4 [SDI médiane : 13.75/20]	1,65 (1,26-2,03)	<0,0001	
Q5 (ref) [SDI médiane : 15.75/20]	-		
<i>Interaction SDI*temps (gain de masse additionnel par rapport à la référence)</i>			<0,0001
Temps*Q1	0,16 (0,09-0,22)	<0,0001	
Temps*Q2	0,06 (0,00-0,12)	0,05	
Temps*Q3	0,005 (-0,06-0,07)	0,88	
Temps*Q4	0,03 (-0,03-0,10)	0,28	
Temps*Q5 (ref)	-		

Les modèles mixtes estiment les coefficients de régression β en kg

¹ Model 1 est ajusté sur la taille et l'âge

² Model 2 est ajusté sur le sexe, l'âge, la taille, l'activité physique, la consommation de tabac, la consommation d'alcool, le revenu mensuel par unité de consommation, le niveau d'étude, apport énergétique sans alcool, le ménage, la ménopause et le statut vis-à-vis de l'emploi. Nous avons effectué 10 imputations multiples pour compléter les données manquantes de l'activité physique.

Tableau 22: Associations prospectives entre les quintiles sexe-spécifiques (Q) de SDI et le risque d'obésité et de surpoids, NutriNet-Santé, 2014-2018, France

	Quartiles de SDI					P tendance ¹
	Q1(médiane du SDI :8,75)	Q2 (médiane du SDI :10,75)	Q3 (médiane du SDI :12,25)	Q4 (médiane du SDI : 13,50)	Q5 (médiane du SDI : 15,50)	
Obésité						
N cas (/15626)	113	61	41	43	23	
Model 1 ¹	5,75 (3,65-9,07) <0,0001	3,48 (2,15-5,63) <0,0001	2,00 (1,20-3,33) 0,0008	2,12 (1,28-3,51) 0,004	1	<0,0001
Model 2 ²	6,11 (3,70-10,08) <0,0001	3,51 (2,13-5,79) <0,0001	2,03 (1,20-3,41) 0,008	2,11 (1,27-3,25) 0,004	1	<0,0001
Model 3 ³	4,03 (2,42-6,10) <0,0001	2,66 (1,61-4,42) <0,0001	2,03 (1,20-3,41) 0,008	2,11 (1,27-3,52) 0,004	1	<0,0001
	Q1 (médiane du SDI :8,75)	Q2 (médiane du SDI :10,75)	Q3 (médiane du SDI :12,25)	Q4 (médiane du SDI :13,50)	Q5 (médiane du SDI :15,50)	
Surpoids						
N cas (/12079)	238	165	138	140	96	
Model 1 ¹	2,55 (2,00-3,25) <0,0001	2,07 (1,61-2,67) <0,0001	1,48 (1,14-1,92) 0,004	1,62 (1,25-2,10) 0,0003	1	<0,0001
Model 2 ²	2,70 (2,06-3,53) <0,0001	2,10 (1,61-2,73) <0,0001	1,48 (1,13-1,93) 0,0039	1,61 (1,24-2,09) 0,0004	1	<0,0001
Model 3 ³	1,49 (1,13-1,95) 0,0042	1,25 (0,96-1,63) 0,10	0,97 (0,74-1,27) 0,81	0,98 (0,75-1,29) 0,91	1	0,0003

Les valeurs correspondent au rapport de risqué et leur intervalle de confiance 95%, en utilisant le Q5 comme référence
Pour les modèles 2 et 3, nous avons réalisé 10 imputations multiples pour les données manquantes de l'activité physique.

¹ Modèle 1 est ajusté sur l'âge, le sexe et la taille.

² Modèle 2 est le modèle 1 avec ajustements supplémentaires pour l'activité physique, la consommation de tabac, la consommation d'alcool, l'apport énergétique sans l'alcool, le revenu mensuel par unité de consommation, le niveau d'étude, le statut vis-à-vis de l'emploi, structure du ménage, et la ménopause.

³ Modèle 3 est le modèle 2 avec un ajustement supplémentaire sur l'indice de masse corporelle à l'inclusion.

Au cours du suivi, nous observons 281 cas d'obésité incidents et 777 cas de surpoids. Le modèle de spline cubique restreint suggère une association linéaire inverse entre le SDI et le risque d'obésité (P=0,71 pour le test de non-linéarité de la RCS) et le risque du surpoids (P=0,38 pour le test de non-linéarité de la RCS). Les résultats des modèles à risques proportionnels de Cox, présentés dans le

Tableau 22, montrent une augmentation du risque d'obésité et du surpoids pour les participants avec un SDI faible. Les rapports de risques du modèle principal (modèle 2) étant de $HR_{Q1 \text{ vs } Q5}=6,11$ (95 % IC = 3,70-10,08) pour l'obésité et $HR_{Q1 \text{ vs } Q5}=2,70$ (95 % IC = 2,06-3,53) pour le surpoids dans le modèle principal. Le modèle 3 ajusté sur l'indice de masse corporelle à l'inclusion montre des

résultats conformes à ceux du modèle mixte puisque les risques d'obésité et de surpoids demeurent plus élevés dans le premier quintile comparativement au cinquième, et ceci indépendamment du poids de départ, ce qui démontre un gain de masse corporelle plus élevé dans le premier quintile.

c/ Interprétation des résultats

Les résultats de cette étude menée sur un échantillon d'adultes français ont mis en évidence une association linéaire et positive entre un indice de durabilité des régimes alimentaires, le SDI et une diminution du risque de développer une obésité ou un surpoids. Nous avons également constaté que la masse corporelle demeure relativement constante au fil du temps, pour les quintiles de participants ayant adopté des pratiques alimentaires plus durables (Q2-Q5), tandis qu'une légère augmentation de la masse corporelle moyenne est observée chez les participants du Q1 (ayant les régimes les moins durables). Comme nous l'avons déjà mentionné (215), les caractéristiques sociodémographiques et de modes de vie diffèrent dans les quintiles de SDI. Toutefois, après de multiples ajustements pour tenir compte de ces facteurs, les associations demeurent significatives. Des études antérieures ont aussi trouvé des associations entre des régimes alimentaires considérés comme plus durables, tels que les régimes méditerranéens, flexitariens ou nordiques, et la perte de poids ou un risque moindre de développer une obésité ou du surpoids (216–218). Cependant, c'est la première fois qu'un indice construit *a priori* pour évaluer la durabilité des habitudes alimentaires a été utilisé et montre une association avec le statut anthropométrique.

Nos résultats peuvent être mis en relation avec d'autres études portant sur les associations entre les consommations de groupes d'aliments, les pratiques alimentaires et l'étiologie de l'obésité. En effet, nos résultats soulignent une différence dans l'apport énergétique apporté par les régimes entre quintiles ; les régimes alimentaires non durables (Q1) étaient plus riches en énergie que les autres. Cet apport énergétique plus élevé dans le Q1 pourrait expliquer en partie la prise de poids et le risque plus grand de développer un surpoids. Toutefois ces différences doivent être interprétées avec prudence. Toutes les calories ne contribuent pas forcément de la même façon à la prise de masses corporelles et les modèles principaux ont été ajustés sur l'apport énergétique sans alcool. L'origine des calories et les nutriments apportés simultanément agissent sur différentes voies de l'homéostasie pondérale (219,220).

Nous avons également observé des différences substantielles entre quintiles dans les consommations moyennes des groupes d'aliments, à l'exception des œufs. En effet, le régime alimentaire du Q5 est riche en aliments d'origine végétale et contient moins d'aliments d'origine animale et de boissons sucrées. Cette structure est plus proche des régimes alimentaires connus

pour être associés à un statut anthropométrique plus favorable à la santé (221–224). Deux études, portant sur les relations entre des indices de la qualité du régime alimentaire et le risque de gain de masse corporelle ou d'obésité ont conclu que ces indices sont souvent associés à une augmentation de la masse corporelle plus faible et à un risque réduit d'obésité (225,226). Aussi, des études ont émis l'hypothèse que la densité énergétique élevée des produits carnés et la concentration élevée de certains nutriments (acides gras saturés ou cholestérol) pourraient avoir une incidence sur le statut anthropométrique (227). Cette hypothèse pourrait aussi expliquer en partie nos résultats. Aussi, certains types de viande sont souvent consommés en même temps que d'autres aliments comme les frites, ou les boissons sucrées qui favorisent l'obésité (227). Ces combinaisons sont notamment visibles dans les régimes moyens du Q1. En effet, la consommation de boissons sucrées ou alcoolisées augmente souvent l'apport énergétique total sans fournir de nutriments essentiels. De plus, une consommation plus élevée de fruits et légumes est observée chez les participants du Q5. Cette consommation de fruits et légumes pourrait expliquer la diminution du risque d'obésité et la stabilisation du poids des participants du Q5. En effet, les fruits et légumes contribuent à diminuer la densité énergétique de l'alimentation et leur forte teneur en fibres peut aider à la régulation du poids.

D'autres attributs des aliments et des régimes, comme le mode de production alimentaire et les processus de transformation, peuvent aussi expliquer en partie les associations observées entre le SDI et le statut pondéral. Premièrement, par construction, la consommation d'aliments biologiques est corrélée positivement avec le SDI. Il a déjà été démontré dans un échantillon différent de la cohorte NutriNet-Santé qu'une consommation fréquente d'aliments biologiques était associée négativement au risque d'obésité et de surpoids (64). Les mécanismes sous-jacents peuvent reposer sur des profils nutritionnels différents des aliments biologiques par rapport aux aliments conventionnels (228–230). De plus, la consommation d'aliments issus de l'agriculture biologique se caractérise par une diminution de l'exposition à des résidus de composés de l'agrochimie (230). Il a été montré que les personnes consommant des aliments biologiques ont moins de résidus de ces composés dans leur urine (231–233). Ainsi, même si le niveau de preuve est encore limité et que ces hypothèses doivent être approfondies et confirmées, la littérature disponible suggère que l'exposition aux pesticides de synthèse, et en particulier ceux qui ont des propriétés de perturbateurs endocriniens, pourrait être un facteur de risque de l'obésité (234–236). Enfin, des études suggèrent que l'exposition à certains composants tels que les additifs, les molécules provenant de l'emballage ou les édulcorants ajoutés, présents dans les produits prêts à l'emploi, les boissons sucrées édulcorées, davantage consommées dans le quintile où les participants ont les habitudes alimentaires les moins durables (Q1), peuvent avoir une incidence sur le statut pondéral (237–239).

Enfin les fortes préoccupations des participants du Q5 concernant les systèmes de production alimentaire, évaluées par certains proxys comme la consommation d'aliments biologiques, la fréquentation de lieux d'approvisionnements alternatifs aux grandes surfaces, ou la consommation réduite des aliments déjà cuisinés, pourraient également jouer un rôle dans la prévention de l'obésité. En effet, l'amélioration des connaissances et un intérêt croissant pour l'alimentation font souvent partie des objectifs des interventions de prévention de l'obésité à long terme (240). Une faible consommation d'aliments prêts à l'emploi associée à une activité culinaire croissante permet aux personnes de s'impliquer davantage dans la composition de leurs repas. Le temps plus important pour préparer des aliments bruts réduirait également les surconsommations (241).

Certaines limites de ce travail sont importantes à considérer. Premièrement, notre analyse est basée sur des données anthropométriques auto-déclarées qui sont sujettes à des erreurs et à des biais potentiels. Toutefois, les données anthropométriques auto-déclarées ont montré une concordance élevée avec les données d'une évaluation clinique dans une étude de validation dans la cohorte publiée précédemment (157). La définition de l'obésité et du surpoids est basée sur la classification de l'OMS, mais cette classification ne tient pas compte des attributs individuels tels que le sexe, l'âge ou la composition corporelle, qui sont connus pour influencer le risque lié au statut pondéral. Nous avons considéré ici toute sorte de prise de poids comme un risque pour la santé, alors que certaines pratiques de perte de poids souvent induites par la pression sociale, chez les personnes sans problème de poids, peuvent avoir des conséquences négatives sur la santé (242,243). Ainsi, l'analyse pourrait bénéficier de l'utilisation d'autres indicateurs comme le tour de taille, les plis cutanés ou des données d'impédancemétrie qui reflètent mieux l'excès de graisse représentant un risque pour la santé (244). Cependant, la masse corporelle demeure une mesure utile, car son évaluation est plus simple et moins intrusive que celles du tour de taille ou des plis cutanés. C'est pourquoi la masse est fréquemment utilisée comme indicateur pour évaluer la prévalence du gain de poids et de l'obésité dans les grands échantillons (244). Deuxièmement, nos analyses ont été réalisées dans une population de volontaires impliqués dans une cohorte portant sur la nutrition et la santé sur le long terme. Ainsi, par leur caractéristique de volontaires, ils sont plus susceptibles d'adopter des comportements plus sains que la population générale, en particulier en ce qui concerne leur alimentation. La non-représentativité de notre échantillon limite la généralisation des résultats. Elle aurait certainement entraîné une sous-estimation de l'incidence de l'obésité. De plus, l'amplitude de l'augmentation de la masse corporelle du premier quintile peut sembler faible, mais elle représente une augmentation moyenne à l'échelle d'une population. En outre, l'augmentation de la masse corporelle est un processus graduel et trois années de suivi peuvent être considérées comme relativement courtes pour évaluer l'association d'intérêt (245). L'étude des associations entre le SDI

et l'obésité sur un plus long terme serait particulièrement intéressante. Il est à noter que nous avons utilisé une première version du SDI qui pourrait être améliorée. Par exemple, certains indicateurs importants liés à la durabilité font défaut (par exemple, l'utilisation de l'eau, la biodiversité, ou d'autres pratiques alimentaires) et pourraient être inclus dans des versions futures du SDI. Il aurait été intéressant d'utiliser des données distinctes de composition nutritionnelle des aliments afin de tenir compte des différences de compositions entre les systèmes de production et lieux d'approvisionnement. En effet, certaines, mais rares références, ont fait état de différences pour certains nutriments, notamment les acides gras, impliqués dans le risque d'obésité selon les méthodes de production (228–230). Toutefois, ces données ne couvrent pas l'ensemble du régime alimentaire. Enfin, nos analyses n'ont pas tenu compte de certains facteurs de confusion comme la pollution de l'air ou les contaminants contenus dans les détergents, les produits de nettoyage ou les cosmétiques qui pourraient peut-être différer d'un quintile à l'autre.

À notre connaissance, cette étude est la première à estimer l'association entre les régimes alimentaires durables avec une approche multicritère et le gain de poids et les risques de survenue de l'obésité ou du surpoids à l'aide d'un indice validé construit spécifiquement pour évaluer la durabilité de l'alimentation observée. Cet indice regroupe plusieurs indicateurs issus d'une approche pluridisciplinaire permettant d'adopter une vision holistique de la durabilité de l'alimentation par rapport aux études précédentes qui n'utilisent qu'un petit nombre d'indicateurs et omettent souvent les indicateurs liés à l'accessibilité économique ou culturelle (136,174). Enfin, notre étude s'appuie sur un large échantillon et des données précises permettant d'accéder à une diversité de comportements plus ou moins durables, en tenant compte de nombreux facteurs de confusion.

En conclusion, la présente étude fournit des arguments scientifiques et quantitatifs suggérant que les personnes qui adoptent des habitudes alimentaires plus durables présentent un risque moindre de prise de masse corporelle, de surpoids et d'obésité, comparativement à des comportements moins durables. Au-delà de l'impact positif des régimes alimentaires durables sur l'environnement et les questions sociales, ces résultats soutiennent l'existence d'un impact bénéfique de l'inclusion de la durabilité dans les régimes alimentaires sur la santé et plaident en faveur de leur promotion et pour des politiques publiques favorisant leur accessibilité pour tous.

2) Étude des associations entre le SDI et la survenue de certaines maladies chroniques

Dans cette seconde partie, nous étudions les associations entre des comportements alimentaires qui obtiennent les meilleurs SDI (les plus durables selon nos critères) et de potentiels effets protecteurs

vis-à-vis de la survenue des maladies chroniques que sont les cancers et les maladies cardiovasculaires.

a/ Méthode et population d'étude

Population d'étude

Parmi les 37 685 participants qui ont rempli le questionnaire Org-FFQ, nous avons exclu les participants considérés comme sous-déclarants ou sur-déclarants (N=2109), les personnes qui avaient de nombreuses covariables manquantes (N=391), celles qui ne vivaient pas en France (N = 743) et celles pour lesquelles des données manquées pour calculer le SDI (N=5054). Les cas prévalents de cancers ou de maladies cardiovasculaires (N=3704) et les participants sans suivi (N=96) ont également été exclus. Finalement, l'échantillon final est composé de 25 589 participants.

Le SDI a été mesuré pour chacun de ces 25 589 participants, puis l'échantillon a été divisé en quartile sexe spécifique de SDI.

Méthode statistique

Les caractéristiques sociodémographiques et de modes de vie de base sont présentées sous forme de pourcentage par quartiles de SDI. Les moyennes des consommations des 17 groupes d'aliments, ajustées sur l'apport énergétique par la méthode des résidus (155), et leur intervalle de confiance à 95% ont été évaluées et reportées par quartile. La multiplicité des tests a été corrigée en utilisant une correction de Dunnett.

Nous avons réalisé des modèles à risques proportionnels de Cox (168) en utilisant l'âge comme échelle de temps pour estimer le risque entre le SDI (codé comme variable continue ou en quartile) et l'incidence des maladies cardiovasculaires, des cancers et des deux. Ainsi, nous avons calculé des rapports de risque et les intervalles de confiance à 95 %, en prenant comme référence le premier quartile (Q1) qui regroupe les participants avec les SDI les moins élevés. Pendant la période de suivi, pour un participant ayant un événement cardiovasculaire ou un cancer, la date du premier événement a été utilisée comme date de censure. Les autres participants contribuent aux personnes-temps des modèles de Cox jusqu'à soit la date du dernier questionnaire rempli, soit la date du décès soit le 13 novembre 2018, la première des éventualités étant retenue.

Nous avons confirmé l'hypothèse de proportionnalité des risques : 1) graphiquement en traçant la probabilité de survie log-log en fonction du temps et 2) en estimant les résidus de Schoenfeld. De plus, la log-linéarité des covariables continues a été validée avec les résidus de la Martingale. Un

premier modèle (modèle 1) n'a pas été ajusté ; le modèle 2 a été ajusté sur l'activité physique, la consommation de tabac, la consommation d'alcool, le revenu mensuel par unité de consommation, le dernier diplôme universitaire obtenu, la situation professionnelle et les antécédents familiaux de cancer ou de maladies cardiovasculaires, la parité, le statut ménopausique, le traitement hormonal pour la ménopause et l'usage de contraceptifs oraux. Pour l'étude des associations avec le risque de cancer, le modèle 2 a également été ajusté sur la taille. La taille étant un facteur de risque connu du cancer. Dans le modèle 3 un ajustement supplémentaire sur l'indice de masse corporelle à l'inclusion a été réalisé et dans le modèle 4 nous avons ajouté un ajustement sur la contribution des aliments issus de l'agriculture biologique dans le régime. Enfin, nous avons analysé l'association dose-réponse du SDI avec le risque de cancers ou de maladies cardiovasculaires en utilisant une fonction spline cubique restreinte (RCS) avec une macro SAS® développée par Desquilbet & Mariotti (214).

b/ Résultats

L'échantillon de l'étude était composé de 25 589 participants sans cancer ni maladie cardiovasculaire au départ et a été suivi en moyenne pendant 3,8 ans.

Le Tableau 23 présente les caractéristiques sociodémographiques et de modes de vie des participants par quartiles de SDI. Le quatrième quartile (Q4) de SDI (regroupe les participants ayant les comportements alimentaires les plus durables selon le SDI) comprend la plus forte proportion de participants ayant de hauts revenus mensuels, une qualification élevée et des modes de vie sains (non-fumeur et consommation modérée d'alcool).

Tableau 23: Caractéristiques sociodémographiques et de modes de vie par quintile sexe spécifique de SDI (Q), NutriNet-Santé (N=25589), 2014, France¹

	Q1 (N=6520)	Q2 (N=5967)	Q3 (N=6837)	Q4 (N=6265)	P ² tendance
SDI (Moyenne [Min-Max])	8,72 (4,0-10,5)	11,2 (9,5-12,3)	13,1 (11,3-14,3)	15,4 (13,0-20,0)	
Sexe (%)					0,72
Femme	76,15	74,53	78,58	74,46	
Âge					<0,0001
Âge<25	3,31	2,41	1,71	1,07	
25a≤Âge<35	13,88	12,58	12,04	9,88	
35a≤Âge<50	29,58	25,34	23,18	21,72	
50a≤Âge<65	35,62	36,51	39,59	42,14	
Âge≥65	17,60	23,16	23,49	25,19	
Qualification scolaire					<0,0001
Inférieur au baccalauréat	27,50	20,93	18,41	14,14	
Équivalent au baccalauréat	16,96	15,11	13,92	11,96	
Post-baccalauréat	55,54	63,96	67,67	73,90	
Revenu mensuelle par unité de consommation					<0,0001
Refuse de déclarer	4,92	5,98	6,96	6,45	
<1200€	25,53	12,25	7,03	3,02	
1200-1800€	36,41	28,35	18,73	9,62	
1800-2700€	23,48	29,89	30,93	24,37	
>2700€	9,66	23,53	36,34	56,54	
Statut du ménage					<0,0001
Vie avec un partenaire	71,89	73,07	75,02	77,51	
Activité physique³					<0,0001
Faible (<30min/j)	25,81	22,95	20,64	17,81	
Modérée (30-60min/j)	36,95	38,78	42,82	45,36	
Élevée (>60min/j)	37,23	38,27	36,54	36,83	
Statut anthropométrique (IMC)					<0,0001
IMC<18.5 kg/m ²	3,47	4,21	4,96	7,37	
18.5-<25 kg/m ²	51,20	59,62	64,99	72,91	
25-<30kg/m ²	28,65	26,26	22,96	16,22	
≥30kg/m ²	16,68	9,92	7,09	3,50	
Consommation de tabac					<0,0001
Non-fumeur	49,09	49,90	49,09	50,77	
Ancien fumeur	37,23	38,22	40,29	40,62	
Fumeur	13,68	11,88	10,62	8,60	
Consommation d'alcool					0,006
Abstinent	5,97	5,06	4,91	5,97	
Consommation modérée (<14g/j)	74,08	74,77	75,26	76,55	
Consommation élevée (≥14g/j)	19,95	20,17	19,83	17,48	

¹ Les valeurs présentées sont des pourcentages, sauf indication contraire.

² P valeurs sont basés sur des tests du χ^2 de Mantel-Haenszel

³ Comme certaines questions sont optionnelles, 2138 participants avaient des données manquantes

Tableau 24: Consommations des groupes d'aliments par quartile sexe spécifique de SDI¹ (N=25589), NutriNet-Santé, 2014, France

	SDI quartiles			
	Q1 (N=6520)	Q2 (N=5967)	Q3 (N=6837)	Q4 (N=6265)
Apport énergétique sans alcool (kcal/j)	2230	1928	1818	1777
Poissons (g/j)	42,37 (41,33-43,42)	45,98 (44,92-47,04)	46,77 (45,78-47,77)	46,53 (45,48-47,58)
Viandes de ruminant (g/j)	64,53 (63,59-65,47)	46,72 (45,77-47,68)	36,55 (35,66-37,45)	24,93 (23,98-25,87)
Autres viandes (g/j)	97,16 (96,06-98,25)	74,07 (72,96-75,18)	60,51 (59,46-61,55)	45,66 (44,56-46,75)
Œuf (g/j)	11,19 (10,9-11,49)	11,51 (11,21-11,8)	11,43 (11,15-11,71)	11,10 (10,8-11,39)
Produits laitiers (g/j)	230,35 (225,21-235,49)	219,18 (213,96-224,4)	217,77 (212,87-222,67)	191,22 (186,08-196,36)
Fromages (g/j)	49,29 (48,28-50,3)	43,68 (42,66-44,71)	38,74 (37,77-39,7)	33,09 (32,07-34,1)
Plats composés (g/j)	40,65 (39,78-41,51)	35,26 (34,39-36,14)	31,53 (30,71-32,35)	27,33 (26,46-28,19)
Aliments gras et sucrés ou salés (g/j)	75,99 (74,77-77,21)	71,17 (69,93-72,41)	68,09 (66,93-69,26)	64,09 (62,86-65,31)
Sauces (g/j)	15,86 (15,48-16,24)	16,6 (16,21-16,99)	17,16 (16,79-17,52)	18,57 (18,19-18,95)
Produits gras (g/j)	26,18 (25,76-26,59)	29,02 (28,6-29,44)	31,09 (30,69-31,48)	32,58 (32,16-32,99)
Féculents raffinés (g/j)	162,31 (160,01-164,6)	153,67 (151,34-156)	143,94 (141,75-146,12)	127,95 (125,65-130,25)
Féculents complets (g/j)	32,72 (31,06-34,37)	49,49 (47,8-51,17)	61,95 (60,37-63,53)	80,69 (79,03-82,34)
Légumineuses et noix (g/j)	14,49 (13,63-15,35)	20,87 (19,99-21,74)	25,3 (24,48-26,12)	34,63 (33,77-35,49)
Fruits et légumes (g/j)	584,89 (575,5-594,28)	694,4 (684,87-703,93)	767,52 (758,57-776,47)	859,41 (850,02-868,8)
Produits à base de soja (g/j)	9,48 (7,07-11,89)	22,14 (19,69-24,59)	37,18 (34,88-39,48)	60,45 (58,04-62,86)
Soda (ml/j)	62,6 (59,95-65,25)	46,35 (43,66-49,03)	35,48 (32,96-38,01)	26,32 (23,68-28,97)
Boissons alcoolisées (ml/j)	85,07 (81,49-88,64)	102,34 (98,71-105,97)	104,24 (100,83-107,65)	100,83 (97,26-104,41)

Poissons : poissons et fruits de mer, Viandes de ruminants : bœufs, veaux et agneaux, autres viandes : porc, volailles et charcuteries,

Produits laitiers : lait, yaourt et autres desserts à base de lait, Produits gras : huile, beurre et autres produits gras.

Tous les P tendance sont <0,0001 sauf pour les œufs (P tendance=0,6)

¹ Les valeurs présentées sont des moyennes ajustées sur l'apport énergétique en utilisant la méthode des résidus (IC95%)

Le Tableau 24 présente les moyennes de consommation quotidienne par groupes d'aliments selon les quartiles de SDI. La consommation d'aliments d'origine animale est associée négativement aux quartiles de SDI, sauf pour le poisson. Une tendance similaire a été observée pour les produits sucrés et gras, les sodas et les féculents raffinés, alors que les consommations de céréales complètes, de produits à base de soja et de fruits et légumes augmentent avec les quartiles de SDI. Enfin, la consommation de boissons alcoolisées est légèrement plus élevée dans les Q4.

Tableau 25: Associations prospectives entre le SDI et le risque de maladie cardiovasculaire, de cancer, ou l'un des deux, NutriNet-Santé (N=25589), 2014-2018, France

	SDI en continu		SDI en quartiles				P tend
	(1-point de plus)	P	Q1	Q2	Q3	Q4	
Maladies cardiovasculaires² et cancers³							
N	640		173	170	168	129	
Personne-année	96495		24358	22369	25886	23881	
Modèle 1	0,91 (0,88-0,94)	<0,0001	1	0,94 (0,76-1,16)	0,78 (0,63-0,97)	0,60 (0,48-0,76)	<0,0001
Modèle 2	0,91 (0,88-0,95)	<0,0001	1	0,92 (0,74-1,15)	0,78 (0,61-0,98)	0,59 (0,45-0,77)	<0,0001
Modèle 3	0,91 (0,88-0,95)	0,0001	1	0,93 (0,75-1,17)	0,79 (0,63-1,00)	0,61 (0,47-0,80)	0,0002
Modèle 4	0,92 (0,88-0,95)	0,0001	1	0,93 (0,74-1,16)	0,79 (0,62-1,00)	0,61 (0,45-0,81)	0,0004
Maladies cardiovasculaires²							
N	158		42	40	40	36	
Personne-année	97654		24652	22641	26189	24090	
Modèle 1	0,88 (0,83-0,93)	<0,0001	1	0,88 (0,57-1,35)	0,74 (0,48-1,13)	0,65 (0,42-1,02)	0,04
Modèle 2	0,91 (0,84-0,98)	0,01	1	0,86 (0,55-1,35)	0,74 (0,46-1,19)	0,65 (0,39-1,08)	0,08
Modèle 3	0,93 (0,86-1,00)	0,05	1	0,91 (0,58-1,43)	0,82 (0,51-1,32)	0,74 (0,44-1,25)	0,23
Modèle 4	0,90 (0,83-0,98)	0,02	1	0,87 (0,55-1,37)	0,76 (0,47-1,23)	0,68 (0,38-1,20)	0,16
Cancers³							
N	483		132	130	128	93	
Personne-année	96855		24462	22462	25970	23960	
Modèle 1	0,92 (0,89-0,95)	<0,0001	1	0,95 (0,75-1,22)	0,80 (0,63-1,02)	0,59 (0,45-0,77)	<0,0001
Modèle 2	0,92 (0,88-0,96)	<0,0001	1	0,94 (0,73-1,21)	0,79 (0,60-1,03)	0,57 (0,42-0,77)	0,0002
Modèle 3	0,92 (0,89-0,96)	<0,0001	1	0,93 (0,72-1,20)	0,78 (0,60-1,03)	0,56 (0,41-0,77)	0,0002
Modèle 4	0,92 (0,88_0,96)	0,0006	1	0,94 (0,73-1,22)	0,80 (0,61-1,05)	0,58 (0,42-0,82)	0,0013

Les analyses sont effectuées grâce au modèle de Cox, avec l'âge comme échelle de temps. Les valeurs présentées sont des rapports de risques [CI95%]

¹ Les P tend de la tendance linéaire sont obtenus à partir de la classification par quartiles en modélisant les quartiles SDI comme variable ordinale.

² Maladies cardiovasculaires : 106 angioplasties, 23 accidents cérébraux vasculaires, 17 infractions myocardiques, 9 syndromes coronaires aigus et 3 décès

³ Cancers : 138 du sein, 78 de la prostate, 46 colorectal, 45 de la peau, 22 du poumon et 154 autres cancers

Modèle 1 est ajusté sur l'âge (dans l'échelle de temps)

Modèle 2 est ajusté sur l'âge (dans l'échelle de temps), le sexe, le niveau d'étude, la consommation de tabac, le revenu par unité de consommation, le statut vis-à-vis de l'emploi, la consommation d'alcool, les antécédents de cancers ou de maladies cardiovasculaires, l'activité physique, l'apport énergétique, et pour les femmes : le nombre d'enfants, le statut ménopausique, l'usage de traitement hormonal pour la ménopause, ou de contraception orale. Pour l'étude du cancer, le modèle 2 est également ajusté sur la taille.

10 imputations multiples ont été effectuées pour compléter les données manquantes de l'activité physique

Modèle 3 est le modèle 2 ajusté sur l'indice de masse corporelle

Modèle 4 est le modèle 2 ajusté sur la consommation d'aliments issus de l'agriculture biologique

Au cours des 3,8 années de suivi, nous avons enregistré 641 maladies chroniques incidentes dont 483 cancers (138 cancers du sein, 78 cancers de la prostate, 46 cancers colorectaux, 45 cancers de la peau, 22 cancers du poumon et 154 autres) et 158 maladies cardiovasculaires (106 angioplasties, 23 accidents cérébraux vasculaires, 17 infarctions myocardiques, 9 syndromes coronaires aigus et 3 décès). Les résultats des modèles de risques proportionnels de Cox sont présentés dans le Tableau 25. Le SDI est associé négativement au risque de maladies chroniques (cancers et maladies cardiovasculaires ensemble). En effet, les participants du Q4 présentent un risque diminué de 34 % (modèle principal) de développer une maladie chronique (cancers ou maladies cardiovasculaires) par rapport aux participants du Q1. Les résultats soulignent que le SDI est associé négativement et significativement au risque de développer un cancer après ajustement sur les principaux facteurs de confusion, alors que le risque de maladies cardiovasculaires diminue significativement lorsque le SDI augmente, mais seulement dans le modèle non ajusté, le modèle 1. La RCS suggère une association linéaire inverse entre le SDI et le risque de maladies chroniques ($P=0.15$ du test de non-linéarité).

Des analyses de sensibilité basées sur le modèle 2, pour lesquelles nous avons exclu les cas diagnostiqués au cours de la première année, ont montré des tendances similaires, bien que les associations soient atténuées.

c/ Interprétation des résultats

Les résultats ont montré une association inverse entre l'adoption d'un régime alimentaire durable évalué à l'aide du SDI et le risque de développer une maladie chronique comme un cancer ou une maladie cardiovasculaire. En particulier, nous avons observé une diminution significative du risque de développer un cancer chez les participants ayant un SDI plus élevé. Cependant, l'association n'était pas significative pour les maladies cardiovasculaires après ajustement pour les facteurs de confusion potentielle.

Peu d'études ont abordé les associations entre des habitudes alimentaires durables, évaluées selon une approche multicritère, et le risque de développer un cancer ou une maladie cardiovasculaire. Récemment, des chercheurs ont évalué la durabilité de trois régimes alimentaires (Méditerranéen, de type western et provégétarien), en fonction de leurs bénéfices pour la santé, les impacts sur l'environnement et l'accessibilité financière. Après un suivi médian de 10,1 ans, les résultats montrent que le régime méditerranéen présente le plus de bénéfices pour la santé (taux de mortalité, de maladies cardiovasculaires non mortelles, de cancers du sein non mortels ou du diabète de type II), alors que le régime provégétarien était le plus écologique et relativement le plus abordable (246). D'autres régimes alimentaires, comme le régime DASH (pour réduire l'hypertension), présentent de plus faibles impacts environnementaux tout en réduisant le risque de

développement de maladies chroniques (247). Ces précédents résultats sont basés sur des régimes alimentaires visant à promouvoir la santé, mais sans tenir compte de la dimension économique et sociale dans leur construction.

Dans la présente étude, nous avons utilisé un score spécialement conçu pour évaluer la durabilité des régimes alimentaires à un niveau individuel. Les régimes alimentaires qui atteignent une valeur élevée de SDI présentent ainsi un bon compromis entre plusieurs dimensions de l'alimentation durable : nutrition, environnement, économie et pratiques alimentaires. Ce compromis est nécessaire, car certaines tensions peuvent apparaître entre certaines dimensions et, par conséquent, entre les aliments recommandés. Par exemple, la consommation de poissons est encouragée dans les régimes cardio-protecteurs alors que la plupart des poissons est pêchée de manière non durable menaçant la ressource (190). Ainsi, les régimes alimentaires des participants du Q4 (pauvres en aliments d'origine animale, sucrés et gras et riches en aliments à base d'aliments d'origine végétale) sont structurés de manière à permettre de concilier au mieux les aspects nutritionnels, environnementaux, sociaux et économiques.

Une hypothèse possible expliquant, du moins en partie, les associations entre le SDI et le risque de cancer pourrait être les différences de structure des régimes entre les quartiles de SDI. Par exemple, une différence marquée dans le niveau de consommation de viande rouge et de viande transformée est perceptible entre le Q1 et le Q4. Tandis que d'autres études ont montré qu'une consommation élevée de viande rouge et de charcuteries est associée à un risque accru de développement de maladies cardiovasculaires, de cancers colorectaux et de la mortalité (71,248–252). Certaines études de modélisation ont montré que des régimes alimentaires dont la production induit de faibles émissions de gaz à effet de serre ou contenant moins de viandes peuvent aussi couvrir les besoins nutritionnels et contribuer à une bonne santé (évaluées en espérance de vie ou en années de vie sans incapacité (DALYs)) (60,148,149). Néanmoins, en se basant sur des régimes alimentaires observés chez des participants de la cohorte EPIC aux Pays-Bas, les chercheurs n'ont trouvé aucune association entre les régimes alimentaires à faibles émissions de gaz à effet de serre ou à faible utilisation des terres, et la mortalité toutes causes confondues et spécifiques, après un suivi de 15 ans (122). Ils ont indiqué que seuls des régimes pour lesquels 35 g de viandes étaient remplacés par des légumes, des fruits secs, des féculents ou du poisson réduiraient considérablement le risque de mortalité (122). En effet, les régimes alimentaires à faibles émissions de gaz à effet de serre ou nécessitant peu de terre peuvent aussi être riches en sucre et en glucides raffinés et pauvres en légumes et en fruits. Dans la présente étude, la consommation élevée de fruits, de légumes, de noix et de légumineuses des participants du Q4 peut expliquer les résultats obtenus sur la santé et la

réduction des impacts environnementaux de leur alimentation. En effet, ces groupes alimentaires ont été associés à des risques moindres de maladies cardiovasculaires, de cancers ou des deux (71,248–252). De plus, la consommation plus élevée de produits sucrés et gras ou de soda chez les participants du Q1 par rapport au Q4 peut également expliquer en partie les résultats. Des apports élevés en sucres ajoutés ont été associés à une mortalité cardiovasculaire accrue et à un gain de poids qui est un facteur de risque pour de nombreuses maladies chroniques (60).

Nous avons également observé que la contribution des aliments issus de l'agriculture biologique dans l'alimentation des participants du Q4 est la plus élevée. Ceci peut également contribuer à expliquer, le moindre risque de survenu d'un cancer pour les participants du Q4 par rapport à ceux du Q1. Des études d'observation ont déjà montré des associations négatives entre une consommation élevée d'aliments biologiques et le risque de cancer du sein et de lymphomes (72), ou de lymphomes non hodgkiniens (74). Une étude a également observé une association négative entre la consommation d'aliments issus de l'agriculture biologique et le syndrome métabolique (72), qui est un facteur de risque majeur de nombreuses maladies chroniques. En effet, l'interdiction de l'usage des pesticides de synthèse dans l'agriculture biologique entraîne des concentrations de certains résidus nettement inférieures dans les aliments biologiques et donc une exposition moindre des consommateurs d'aliments biologiques à certains composés soupçonnés d'être impliqués dans le développement du cancer ou de dérèglements métaboliques (231).

Certaines limites de notre étude méritent d'être soulignées. Comme pour les études précédentes, la première limite concerne l'évaluation des habitudes alimentaires durables à partir d'un indice élaboré à partir d'un échantillon composé de volontaires pouvant limiter la généralisation de nos résultats puisque les caractéristiques de volontaires présents dans notre échantillon peuvent avoir contribué à diminuer ou augmenter les associations. De plus, certains indicateurs de durabilité de l'alimentation sont absents du SDI alors qu'il serait intéressant de les considérer dans une nouvelle version de l'indice. Deuxièmement, la durée du suivi est relativement courte, ce qui limite aussi la puissance statistique de nos modèles, et pourrait expliquer en partie pourquoi les associations entre le SDI et le risque de survenue d'une maladie cardiovasculaire ne sont pas significatifs après ajustement sur les principaux facteurs de confusion. De plus, la courte durée du suivi a limité l'inférence causale. Il sera donc intéressant à l'avenir de réévaluer les associations entre le SDI et le risque de développer une des deux pathologies dans la cohorte afin d'étudier les effets potentiels à long terme. En effet, certains processus cancérogènes ou cardiovasculaires peuvent prendre de nombreuses années. De plus, nous n'avons pas analysé les associations par maladies cardiovasculaires ou par sorte de cancers en raison d'un nombre limité de cas. Enfin, bien que nous

ayons tenu compte d'un grand nombre de facteurs d'ajustement, la confusion résiduelle ne peut être exclue.

Il convient également de noter les points forts importants de cette étude. À notre connaissance, c'est la première fois que sont évaluées les associations entre le risque de cancers ou de maladies cardiovasculaires et un indice multicritère d'évaluation de la durabilité des habitudes alimentaires. Cette étude permet ainsi d'estimer les bénéfices d'une alimentation plus durable tant pour l'individu que pour l'environnement. Bien que d'autres études prospectives soient nécessaires pour confirmer les associations négatives entre le SDI et la survenue de cancers, nos résultats concordent avec les résultats d'études de modélisation montrant que l'adoption de régimes alimentaires plus durables serait également meilleure pour la santé (14,149).

En conclusion, ce travail suggère que les participants ayant un SDI élevé et donc un régime alimentaire présentant un bon compromis entre les différentes dimensions de la durabilité ont un risque plus faible de développer un cancer, et potentiellement des maladies cardiovasculaires, comparativement aux participants ayant une consommation alimentaire moins durable. Ces résultats pourraient être liés à la structure de leur alimentation plus végétale et plus saine, ainsi qu'à la contribution élevée des aliments biologiques dans leur alimentation. L'étude fournit des arguments scientifiques dans un domaine de recherche épars liant maladies chroniques et régimes alimentaires durables, même si des recherches futures sont nécessaires pour confirmer les associations et les étudier sur le long terme. Enfin, dans le contexte actuel de systèmes alimentaires non viables sur le long terme et d'une prévalence importante et croissante des maladies chroniques, ces résultats peuvent être d'un intérêt majeur pour justifier la prise en compte de la durabilité dans les politiques agricoles et de santé publique, par exemple dans la mise en œuvre des repères alimentaires pour la population générale comme cela a été préconisé en France par le Haut Conseil de la Santé Publique en 2017.

3) Comparaison des forces de prédiction entre le SDI et ses sous-indices

Dans cette troisième partie, nous présentons des résultats complémentaires qui avaient pour objectif de comparer les forces de prédiction des événements de santé pour lesquels nous avons observé des associations significatives (obésité, surpoids, cancers et maladies cardiovasculaires combinés et cancers seuls) entre le SDI et ses sous-indices. En particulier, on s'interroge sur une possible

détérioration ou au contraire une amélioration de la prédiction lorsque le score inclut des éléments qui ne sont pas uniquement nutritionnels.

a/ Méthodes

Pour ce travail, nous avons reproduit les modèles principaux en continu des analyses précédents en introduisant les deux scores à comparer dans le modèle, selon la méthode décrite par Chiueve (169). La comparaison des résultats de modèles non emboîtés n'est pas correcte statistiquement. La taille des échantillons était la même. Nous avons ensuite mesuré la statistique de Wald, afin d'obtenir une P-valeur, nous permettant de conclure statistiquement sur les différences de rapports de risque observés.

b/ Résultats

Les résultats sont présentés dans le Tableau 26. On observe que les associations entre le SDI et les événements de santé (obésité, surpoids, maladies chroniques et cancers) sont moins fortes en ajustant sur les sous-scores, mais elles restent significatives. Au contraire, les associations avec les sous-scores ne sont significatives (sauf pour le sous-score nutrition et l'obésité) lorsqu'on ajuste sur le SDI.

Les tests de Wald montrent que les différences observées sont significatives uniquement pour l'obésité entre le SDI et les sous-scores économique, des pratiques alimentaires et de l'environnement et pour le surpoids entre le SDI et les sous-scores économique et de pratiques alimentaires. Pour les autres, nous ne pouvons pas conclure statistiquement sur des différences de force de prédiction entre le SDI et les autres sous-scores.

Tableau 26: Comparaison des associations avec la santé entre les quatre sous-scores et le SDI par la méthode de Chiuve, NutriNet-Santé, 2014-2018, France

	Obésité HR [95%IC]	<i>P Wald</i> ²	Surpoids HR [95%IC]	<i>P Wald</i> ²	Maladies chroniques ⁵ HR [95%IC]	<i>P Wald</i> ²	Cancer HR [95%IC]	<i>P Wald</i> ²
SDI	0.66 (0.59-0.73)		0.80 (0.75-0.85)		0,91 (0,88-0,95)		0,92 (0,89-0,95)	
SDI³	0.76 (0.7-0.82)	0.0012	0.91 (0.87-0.95)	0.99	0,91 (0,86-0,96)	0.99	0,91 (0,86-0,97)	0.26
Sous-score environnement⁴	1.09 (0.93-1.27)		0.91 (0.83-1.00)		1,03 (0,93-1,14)		1,01 (0,9-1,13)	
SDI³	0.82 (0.77-0.88)	0.87	0.88 (0.85-0.91)	0.13	0,92 (0,88-0,97)	0.31	0,91 (0,86-0,96)	0.13
Sous-score nutritionnel⁴	0.83 (0.72-0.96)		0.97 (0.89-1.05)		0,98 (0,89-1,08)		1,02 (0,91-1,14)	
SDI³	0.78 (0.73-0.82)	<0.001	0.88 (0.85-0.91)	0.01	0,92 (0,88-0,95)	0.99	0,92 (0,88-0,96)	0.17
Sous-score économique⁴	1.13 (0.95-1.34)		1.01 (0.91-1.12)		1,01 (0,91-1,13)		1,01 (0,89-1,15)	
SDI³	0.77 (0.72-0.83)	0.003	0.85 (0.82-0.89)	<0.001	0,92 (0,88-0,87)	0.34	0,93 (0,88-0,98)	0.53
Sous-score des pratiques alimentaires⁴	1.03 (0.90-1.18)		1.10 (1.02-1.19)		0,98 (0,90-1,07)		0,97 (0,87-1,07)	

¹ Les rapports de risque et leur intervalle de confiance à 95% en continu dans les modèles principaux (modèle 2) des analyses précédentes, sur le même échantillon.

² La statistique de Wald se mesure de la manière suivante : $X^2 = [(\beta_1 - \beta_2) / \text{racine carrée}(\text{var}(\beta_1 - \beta_2))]^2$ où β_1 est le β du premier score, et β_2 le β du second score et $\text{var}(\beta_1 - \beta_2) = \text{var}(\beta_1) + \text{var}(\beta_2) - 2 * \text{cov}(\beta_1, \beta_2)$.

³ Ajustement supplémentaire sur le sous-score

⁴ Ajustement supplémentaire sur le SDI

c/ Interprétation des résultats

Ces derniers tests montrent que la considération de l'environnement, des pratiques alimentaires et de l'économie dans le calcul du SDI ne détériore pas la prédiction des événements de santé par la nutrition, sur notre échantillon et ce après 3-4 ans de suivi. Pour l'obésité et le surpoids, le SDI reflétant un compromis entre les principales dimensions de l'alimentation durable, améliore significativement la prédiction par rapport à la plupart des sous-indices (environnement, économie, pratiques alimentaires).

Les associations en continu entre le SDI et le risque de cancer ou le risque de maladies chroniques (cancer et les maladies cardiovasculaires combinées) sont bien moins fortes que dans le cas de l'obésité. Le suivi court pourrait expliquer le fait que les tests de Wald ne soient pas significatifs. On note toutefois que les rapports de risque sont plus faibles et inférieurs à 1 pour le SDI par rapport à ceux des sous-indices.

En ce qui concerne les associations avec le risque d'obésité et de surpoids, l'inclusion de la dimension environnement dans le calcul du SDI favorise les régimes avec une faible contribution des aliments d'origine animale par comparaison au sous-score nutrition. Ceci pourrait expliquer le fait que les rapports de risques sont plus faibles pour le SDI que pour le sous-score nutrition, même si, statistiquement nous ne pouvons pas conclure sur des différences de force de prédiction (P Wald non significatif). Nos résultats ne nous permettent pas non plus de conclure (statistiquement) sur des différences dans la prédiction du surpoids entre le SDI et le sous-score environnement. Le sous-score environnement favorisant les régimes très végétaux, ces différents résultats sont en cohérence avec les résultats d'une revue de la littérature qui conclut que l'adoption de régimes riche en aliments d'origine végétale serait bénéfique pour prévenir le risque d'obésité et de surpoids (253). Une autre revue de la littérature montre que les personnes dont le régime est très végétal présentent un profil de biomarqueurs protecteur vis-à-vis du risque d'obésité (254).

Finalement, le SDI qui inclut dans son calcul des indicateurs non nutritionnels semble être un bon prédicteur de la survenue de certains événements de santé, même si nous ne pouvons statistiquement conclure que son usage comparé à celui de sa composante nutritionnelle isolée est plus performant. Cependant, n'étant pas moins performant, cela justifie l'intégration de la notion de durabilité dans les problématiques de santé publique.

VI Identification des leviers d'amélioration de la durabilité des régimes par l'optimisation

L'objectif de cette dernière partie est d'identifier les principaux leviers pour que les régimes alimentaires des participants de l'étude NutriNet-Santé répondent aux principaux besoins nutritionnels, en réduisant les impacts sur l'environnement de leur production, à un prix proche ou inférieur à ce qui est dépensé actuellement et en évitant de bouleverser les habitudes alimentaires.

Pour répondre à cet objectif et compléter les travaux observationnels, nous avons choisi de mettre en œuvre une approche par optimisation.

Précédemment, nous avons observé une forte association entre le niveau de végétalisation du régime et leur durabilité. Ceci nous conduit à faire l'hypothèse que les solutions proposées pourraient différer selon le répertoire alimentaire de départ d'un individu et la contribution des aliments d'origine animale dans le régime initial. Ainsi, nous avons choisi de présenter les résultats obtenus en distinguant plusieurs groupes de personnes par le niveau de végétalisation du régime observé, mesuré par un score provégétarien (119).

1) Choix du modèle et population d'étude

Nous décrivons dans cette partie l'approche d'optimisation mise en œuvre.

a/ Les variables du problème

Notre problème d'optimisation contient deux types de variables (livrables de l'optimisation) :

- Les quantités totales (conventionnelles et biologiques) de 235 items alimentaires introduits dans le modèle. Le questionnaire de recueil des consommations alimentaires contenait 264 items. Nous n'avons pas considéré les items correspondant aux boissons n'apportant pas ou très peu de calories (eau, thé, café, infusion...), les items pour lesquels des impacts environnementaux étaient indisponibles (comme l'alcool anisé ou l'ananas) et ceux qui n'avaient pas d'équivalent en agriculture biologique (comme les substituts protéiques).
- La proportion de chacun des 235 items issus de l'agriculture biologique, compris dans l'intervalle [0 ; 1].

Afin de tenir compte des interdits culturels ou des choix de régimes sélectifs, nous avons mis en place la règle suivante, distinguant différents cas selon la consommation et le groupe d'aliments de l'item :

- Les items consommés par la personne, c'est-à-dire dans le répertoire alimentaire. Ces items sont pris en compte.
- Les items non consommés par la personne et qui du point de vue de la santé (ex. : pâte à tartiner) ou de la culture (ex. : le porc) ne peuvent pas être intégrés dans le régime. Ces items ne sont pas intégrés dans le problème, c'est-à-dire que si la personne ne déclare pas les consommer son régime optimisé n'en contiendra pas.
- Les items non consommés par la personne, mais qui n'ont pas d'interdits culturels fréquents et qui sont connus pour avoir des bénéfices pour la santé (fruits, légumineuses...) sont intégrés. Cependant, leur ajout sera limité par la fonction objectif de minimisation des écarts avec la consommation habituelle (voir partie 2).

b/ Les fonctions objectifs

Les fonctions objectifs représentent ce que l'on souhaite maximiser ou minimiser dans le problème. Contrairement aux contraintes qui sont fixes et qui bloquent le problème, les éléments de la fonction objectif représentent uniquement un objectif à atteindre.

Nous avons décomposé le problème en trois objectifs :

- Minimiser les impacts sur l'environnement de la production des régimes alimentaires
- Maximiser la consommation des aliments issus de l'agriculture biologique, car ce mode de production permet de diminuer l'exposition à certains composés potentiellement toxiques et que leur production apporte des bénéfices pour la conservation de la biodiversité, la réduction de la pollution des eaux et des sols.
- Minimiser les écarts aux habitudes de consommation observés afin que les solutions soient plus facilement acceptables par les individus. Nous faisons en effet l'hypothèse que s'il y a moins de changements par rapport au régime observé alors le régime sera plus acceptable.

Nous avons dans nos bases de données trois indicateurs pour évaluer l'impact environnemental de la production des régimes alimentaires. Il était intéressant de pouvoir minimiser les trois, d'où l'introduction du score du pReCiPe dans cette fonction de minimisation des impacts sur l'environnement (137). Le pReCiPe se mesure de la manière suivante :

$$\text{pReCiPe} = 0,0459 * \text{GES}(\text{kgCO}_{2\text{eq}}/\text{kg}) + 0,0025 * \text{Conso_énergie}(\text{MJ}/\text{kg}) + 0,0439 * \text{Occupation_sols}(\text{m}^2.\text{an}/\text{kg})$$

La fonction objectif de minimisation des impacts environnementaux est la suivante :

$$g = \sum_{i=1}^{235} \text{Recipe}_{\text{bio}}(i) * \text{quantité}_{\text{bio}}(i) * \text{proportion}_{\text{bio}}(i) + \text{Recipe}_{\text{conv}}(i) * \text{quantité}_{\text{conv}}(i) * (1 - \text{proportion}_{\text{bio}}(i))$$

i: item

La fonction de maximisation de la quantité (en gramme) d'aliments issus de l'agriculture biologique s'écrit de la manière suivante :

$$h = \sum_{i=1}^{235} \text{quantité}_{bio}(i) * \text{proportion}_{bio}(i)$$

i=item

Enfin, plusieurs fonctions peuvent être utilisées pour minimiser les écarts aux habitudes de consommation alimentaire observés. Nous avons choisi la fonction suivante :

$$f = \sum_{i=1}^{235} \left(\frac{\text{Conso}_{obs}(i) - \text{Conso}_{opt}(i)}{EC(i)} \right)^2$$

i=item

Pour cette dernière fonction, nous aurions pu prendre la valeur absolue plutôt que le carré. L'avantage de prendre le carré est de rendre notre problème quadratique, ce qui rend les calculs plus aisés pour l'optimisation sous SAS®. Il est à noter que l'utilisation du carré plutôt que la valeur absolue a tendance à favoriser les petites modifications sur beaucoup d'items. Alors que l'usage de la valeur absolue aurait privilégié peu de modifications, mais de plus grande amplitude.

c/ Les contraintes

Il est possible de rajouter des contraintes dans le problème d'optimisation. Les contraintes sont des éléments qui doivent être respectées pour la détermination des solutions. Elles peuvent être sous forme d'égalité ou d'inégalité non stricte. Nous décrivons ensuite les contraintes que nous avons incluses dans le problème.

Les contraintes sur l'apport énergétique

La solution extrême pour minimiser les impacts environnementaux liés à la production des régimes serait de manger beaucoup moins, voire pas du tout.

Ainsi pour éviter ces solutions et apporter aux personnes un apport calorique adéquat, nous avons introduit la contrainte suivante :

- Le régime optimisé doit apporter au moins 92% du besoin (besoin métabolique de base et de l'activité physique : mesuré par l'équation de Schofield (166)) de la personne.
 - Le régime optimisé ne pourra pas apporter plus de 8% du besoin estimé par l'équation de Schofield.
- ⇒ $\text{Besoin} * 0,92 < \text{apport énergétique du régime} < \text{besoin} * 1,08$

Nous avons retenu le seuil de 8% qui est référencé comme le seuil d'erreur toléré dans le calcul des besoins.

Les contraintes sur les apports nutritionnels

Afin que les régimes optimisés couvrent les besoins nutritionnels, nous avons introduit plusieurs contraintes sur les apports en nutriments présentés dans le Tableau 27.

Tableau 27: Contraintes nutritionnelles appliquées lors de l'optimisation

Nutriments	Contraintes Femmes non ménopausées	Contraintes Femmes ménopausées	Contraintes Hommes
Alcool (g/j)	≤14	≤14	≤14
	≤Conso obs	≤Conso obs	≤Conso obs
Protéine (g/j)	[0,66*bw-2,2*bw]	[0,66*bw-2,2*bw]	[0,66*bw-2,2*bw]
Glucides simples sans lactose (g/j)	≤100	≤100	≤100
Lipides (%)	≤40%*aesa	≤40%*aesa	≤40%*aesa
Acides gras saturés (%)	≤12%*aesa	≤12%*aesa	≤12%*aesa
Fibres (g/j)	≥23	≥23	≥23
Sélénium (µg/j)	[70-300]	[70-300]	[70-300]
Zinc (mg/j)	[11-25]	[11-25]	[14-25]
Cuivre (mg/j)	[1,0-5,0]	[1,0-5,0]	[1,3-5,0]
Sodium (mg/j)	≤2300	≤2300	≤2300
Potassium (mg/j)	Ratio équimolaire avec le sodium	Ratio équimolaire avec le sodium	Ratio équimolaire avec le sodium
Phosphore (mg/j)	≥550	≥550	≥550
Magnésium (g/j-mg)	≥5*bw	≥5*bw	≥5*bw
Iode (µg/j)	[150-600]	[150-600]	[150-600]
Fer (mg/j)	≥ 16	≥11	≥11
Calcium (mg/j)	[950-2500]	[950-2500]	[950-2500]
Vitamine E (mg/j)	[9,9-300]	[9,9-300]	[10,5-300]
Vitamine C (mg/j)	≥110	≥110	≥110
Vitamine B12 (µg/j)	≥4	≥4	≥4
Vitamine B9 (µg/j)	≥330	≥330	≥330
Vitamine B6 (mg/j)	[1,5-25]	[1,5-25]	[1,8-25]
Vitamine B5 (mg/j)	≥4,7	≥4,7	≥5,8
Vitamine B3_t	[(5,44*kcal)/1000-900]	[(5,44*kcal)/1000-900]	[(5,44*kcal)/1000-900]
Vitamine B2	≥ (0,55*kcal)/1000	≥(0,55*kcal)/1000	≥(0,55*kcal)/1000
Vitamine B1	≥ (0,3*kcal)/1000	≥(0,3*kcal)/1000	≥(0,3*kcal)/1000
Vitamine A (1-12) (µg/j équivalent rétinol)	[650-3000]	[650-3000]	[750-3000]

Abréviations : aesa : apport énergétique sans alcool du régime observé

Bw : masse de la personne

kcal : énergie en calorie du régime observé

Moy obs : consommation observée

Les contraintes de consommation des items, des groupes et sous-groupes d'aliments

Pour chacun des groupes et des sous-groupes alimentaires, nous avons ajouté la contrainte pour que les quantités apportées par les groupes et sous-groupes ne dépassent pas les quantités consommées par le 95^{ème} percentile.

Les groupes et sous-groupes considérés sont présentés dans le Tableau 28.

Pour chacun des items, nous avons également ajouté des contraintes pour ne pas dépasser les quantités consommées par les participants du 95^{ème} percentile.

Afin de tenir compte des expositions à des substances nocives par la consommation de poissons, nous avons ajouté deux contraintes. Les contraintes ont été fixées à partir des recommandations du Haut Conseil de Santé Publique, pas plus de deux portions de poissons par semaine, dont pas plus d'une portion de poissons gras. Nous avons alors imposé une consommation de poisson au total inférieure à 28g/j et une consommation de poissons gras inférieure à 14g/j.

Tableau 28: Répartition des items dans les groupes et sous-groupes d'aliments

Sous-groupes	Groupes	Sous-groupes	Groupes
Fruits : Compote, compote sans sucre, fruits au sirop, pomme, poire, agrume, banane, pêche, abricot, melon, cerise, fraise, prune, kiwi, raisin, et fruits exotiques	Fruits et légumes	Lait : lait entier, lait demi-écrémé, lait écrémé, lait fermenté	Produits laitiers
Légumes : artichaut, oignon, ail, salade verte, carottes, cèleri, tomate, betterave, chou rouge, chou blanc, chou vert, choux de Bruxelles, chou-fleur, brocolis, haricots verts, endive, épinards, concombre, poivron, poireau, fenouil, potiron, navet, petits pois, et, mais		Produits laitiers : yaourt entier, yaourt entier aux fruits, yaourt demi-écrémé, yaourt demi-écrémé aux fruits, yaourt zéro, yaourt zéro aux fruits, yaourt au bifidus, yaourt au bifidus et aux fruits, fromage blanc zéro, fromage blanc 20%, fromage blanc 20 % aux fruits, fromage blanc 40%, fromage blanc de brebis, fromage blanc de chèvre, fromage blanc aux fruits, petit suisse	
Soupe de légumes		Fromages : fromage fondu, bleu, brie, fromage de chèvre, gouda, édram, mozzarella, fromage allégé, fromage frais	
Jus de fruits		Desserts lactés : Entremet et crème au caramel	
Pommes de terre et topinambour	Féculent	Pain et biscottes	Féculent
Légumineuses		Céréales brutes : pâtes complètes, riz complet, riz sauvage, pain complet	
Noix et graines		Céréales : céréales nature, muesli, muesli nature, semoule, quinoa, riz blanc, pâtes	
Poissons et fruits de mer		Huile : carthame, lin, mais, mélange, noisette, olive, pépins, soja et	

		tournesol	
Viandes de ruminants : steak haché, bœuf rôti, côte de bœuf, bœuf à la braise, pot-au-feu, escalope de veau, rôti de veau, côte de veau, veau sauté, côte d'agneau, épaule d'agneau, sautés d'agneau, foie, tripes, viande panée	Viandes	Beure : beurre de cuisson et beurre pour tartiner	
Viandes de porc : jambon blanc, jambon cru, saucisson, cervelas, mortadelle, pâté, rillettes, lardons, saucisses, côte de porc, rôti de porc, porc échiné, filet de porc,		Biscuits : biscuits secs au chocolat, biscuits secs, petit gâteau, viennoiserie et brioche	PGS
Volailles : lapin et dinde		Sauce : Moutarde, ketchup, sauce tartare, sauce béchamel, sauce pâtes, sauce viande, et vinaigrette	
Alcool : Cidre, bière, vin blanc, vin rouge, apéritif, alcool fort, liqueur, digestif et cocktail		Aliments composés : crêpe salée, quiche, croque-monsieur, pizza, raviolis, sandwich grec, plat asiatique, hamburger, panini, choucroute, cassoulet	
Soja		Snack : gâteau apéritif, chips, popcorn et oléagineux salés	
Lait de soja		Produits gras : Mayonnaise, crème fraîche, et crème végétale	
Boissons non sucrées : café au lait, café au lait végétal, chocolat chaud, chocolat chaud végétal, thé au lait, thé au lait végétal, et bière sans alcool		Sucrerie : miel et confiture, Nutella, sucre, chantilly, chocolat, bonbon, tarte aux fruits, flan, cake, brownie, gâteau à la crème, barre au chocolat, crêpe sucrée, sorbet, glace, cône, céréales aromatisées	PGS
Soda	PGS	Œufs	

La contrainte sur le prix

Les lieux préférentiels d'achat des personnes par groupe alimentaire et les prix des items dans chacun des lieux proposés étant disponibles, le programme d'optimisation prend en compte les lieux d'achat de chaque item et donc le prix dans ce lieu privilégié. Lorsque le prix était nul, cas des aliments autoproduits ou des produits jamais achetés par un participant le prix des supermarchés a été appliqué. Ce choix était indispensable pour éviter que l'algorithme ne choisisse que des items à prix nul, sachant que les items autoproduits sont limités en quantité et sont saisonniers.

Certaines personnes dépensent une somme d'argent qui ne leur permettrait pas de répondre à l'ensemble des contraintes nutritionnelles et sur les groupes d'aliments. Ainsi, nous avons proposé de faire une étape préliminaire (notée Étape 0) avec l'ensemble des contraintes sauf celle sur le prix en minimisant les écarts de consommation à l'observé pour obtenir un prix minimum de régime adéquat sur le plan nutritionnel et qui s'écarte peu des habitudes alimentaires.

La contrainte sur le prix était alors de ne pas dépasser le maximum entre le prix observé et le prix de cette étape 0.

d/ Résolution du problème

Approche hiérarchique

Plusieurs objectifs sont co-occurents dans le problème à résoudre. Nous avons donc opté pour une approche hiérarchique pour résoudre ce problème multicritère.

Nous commençons par minimiser les impacts environnementaux reliés à la production des régimes (le pReCiPe). La valeur obtenue dans cette première étape du pReCiPe que l'on notera pReCiPe_1 nous sert pour déterminer une nouvelle contrainte pour la seconde étape de maximisation des quantités d'aliments issus de l'agriculture biologique. Nous choisissons en effet d'autoriser un pourcentage noté ξ de détérioration de l'amélioration atteinte à l'étape 1 (pRecipe_obs- pReCiPe_1), lors de la seconde étape. La nouvelle contrainte s'écrit donc de la manière suivante :

$$g \leq \text{pReCiPe}_1 + \xi (\text{pRecipe_obs} - \text{pReCiPe}_1) \quad (g \text{ étant la fonction objectif du pReCiPe})$$

À la suite de l'étape 2 de maximisation de la quantité d'aliments issus de l'agriculture biologique dans le régime, nous obtenons une seconde valeur du pReCiPe, noté pReCiPe_2 et une valeur de la quantité d'aliments biologiques maximisée dans le régime, noté Bio_2.

De la même façon que précédemment, nous définissons deux nouvelles contraintes :

$$g \leq \text{pReCiPe}_2 + \xi (\text{pRecipe_obs} - \text{pReCiPe}_2) \quad (g \text{ étant la fonction objectif du pReCiPe})$$

$$h \geq \text{Bio}_2 - \xi (\text{Bio}_2 - \text{Bio_obs}) \quad (h \text{ étant la fonction objectif du bio})$$

Ces deux nouvelles contraintes sont introduites dans une troisième étape consistant à minimiser les écarts aux habitudes de consommation.

Finalement, la démarche choisie est schématisée dans la Figure 14.

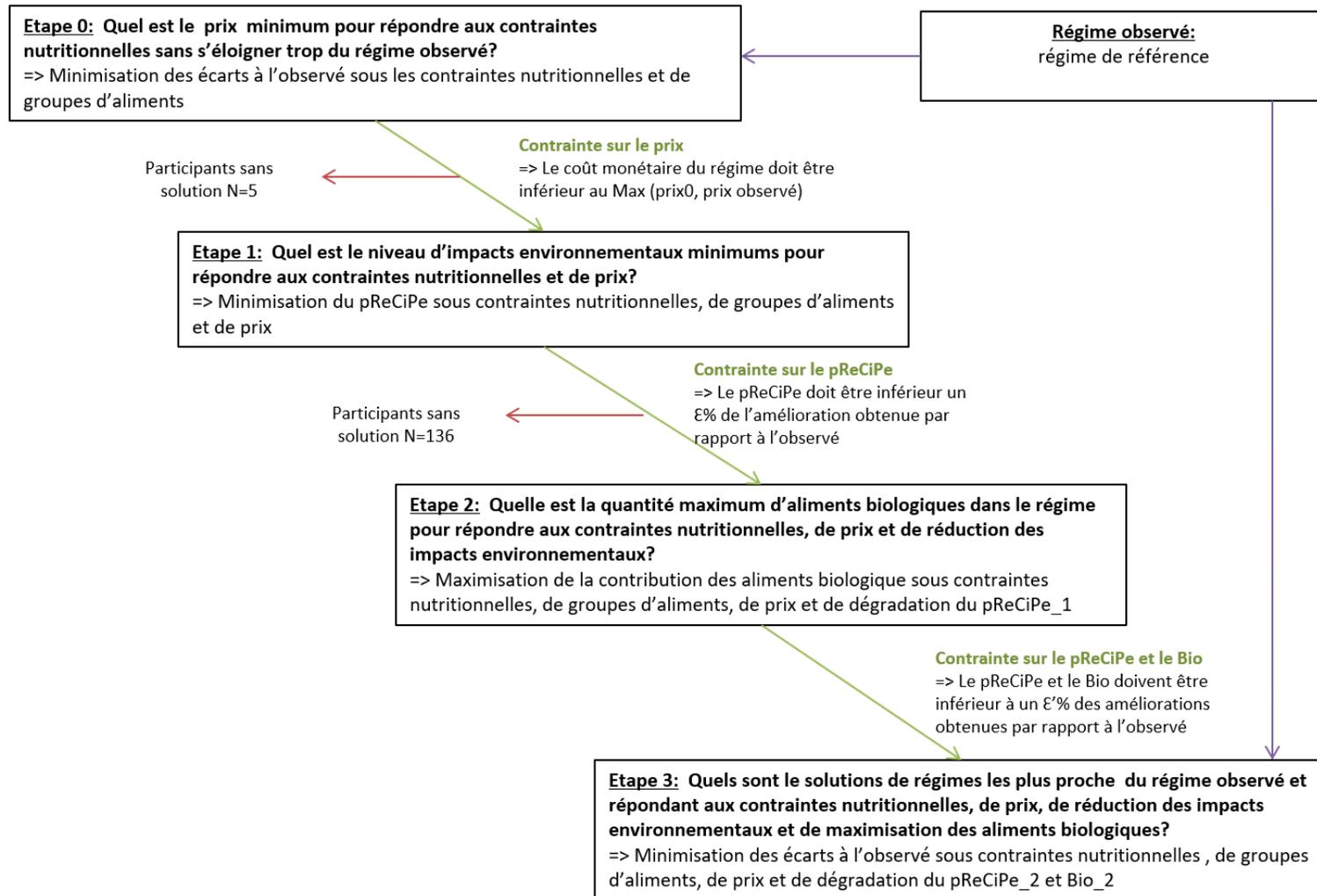


Figure 14: Schéma du processus d'optimisation

Choix des ξ

Nous avons réalisé des prétests afin de déterminer des valeurs de ξ (pourcentages de dégradations) pertinents, sur un sous-échantillon de 50 femmes non ménopausées. Les ξ de ces prétests étaient les mêmes dans les étapes 2 et 3, et égales à 10%, 25%, 50%, 60% ou 75% de dégradation.

L'analyse des conflits entre l'amélioration du bio et du pReCiPe, nous a conduits à décomposer davantage les niveaux de dégradation entre 10% et 50%. Le résultat avec $\xi=0.6$ (60% de dégradation) moins informatif a été supprimé. Ainsi, pour l'ensemble de l'échantillon, nous avons choisi de faire 5 scénarios d' ξ pour les étapes 2 et 3. Les ξ retenues sont : 10%, 20%, 30%, 50% et 75%.

Logiciel d'optimisation et choix des paramétrages

Afin de résoudre le problème d'optimisation, nous avons utilisé la procédure proc optmodel[®] de SAS[®]. Dans le cas de problèmes non linéaires, nous avons utilisé l'option NLP en utilisant l'algorithme activeset. Nous avons considéré l'option Multistart pour tester plusieurs minimums/maximums locaux et l'option Maxiter pour contrôler le nombre d'itérations.

e/ La population d'étude

Notre échantillon de départ contenait 29 413 participants. Néanmoins, certains ont déclaré des consommations très éloignées de leur besoin estimé par les équations de Schofield. Afin de nous affranchir des différences entre les besoins calculés et les consommations estimées, nous avons exclu de nos analyses les participants dont la déclaration des apports énergétiques est supérieure ou inférieure à 20% des besoins estimés.

L'échantillon analysé est composé de 12 308 participants. Néanmoins, nous ne sommes pas parvenus à trouver des solutions pour l'ensemble de l'échantillon et présentons ensuite les résultats pour 12 166 participants. L'analyse des résultats a consisté à comparer le régime observé de chacun des participants avec les solutions optimisées.

2) Résultats

a/ Caractéristiques de la population d'étude

L'échantillon des participants pour qui nous avons identifié des solutions dans toutes les étapes a été segmenté en tertiles de score provégétarien mesuré. Nous présentons les principales caractéristiques sociodémographiques et de modes de vie par tertile de score provégétarien dans le Tableau 29.

Nous trouvons des différences significatives entre tertiles de score provégétarien pour l'essentiel des caractéristiques testées à l'exception de la proportion de femmes et des niveaux de revenu.

Tableau 29: Caractéristiques sociodémographiques et de modes de vie des participants (N=12166) par tertile de score provegetarien¹, NutriNet-Santé 2014

	T1 (N=4166)	T2 (N=4079)	T3 (N=3921)	P tendance ²	P ² χ^2
Score Provegetarian moy (min-max)	29,9 (16,0-33,0)	36,0 (34,0-38,0)	42,5 (39,0-57,0)		
Sexe				0,88	0,95
Femme	79,60	79,31	79,47		
Age				0,01	0,01
Age<25	1,75	1,32	1,56		
25≤Age<35	10,63	9,68	9,18		
35≤Age<50	23,76	21,67	22,67		
50≤Age<65	37,78	38,22	39,48		
Age≥65	26,07	29,10	27,11		
Qualification scolaire				<0,0001	<0,0001
Inférieur au baccalauréat	23,43	21,50	19,08		
Équivalent au baccalauréat	16,01	13,95	13,67		
Après le baccalauréat	60,56	64,55	67,25		
Revenu par unité de consommation				0,56	0,13
Refuse de déclarer	5,88	5,49	6,15		
<1200 euros	11,43	10,47	11,27		
1200-1800 euros	23,43	23,00	22,88		
1800-2700 euros	28,68	27,16	27,75		
>2700 euros	30,58	33,88	31,96		
Activité physique³				<0,0001	<0,0001
>60min/j	30,11	30,58	35,38		
30-60min/j	43,25	44,11	45,95		
<30min/j	26,64	25,32	18,68		
Statut anthropométrique (IMC)				<0,0001	<0,0001
IMC<18.5 kg/m ²	3,58	4,73	6,68		
18.5-24.99 kg/m ²	57,92	65,16	71,21		
25-29.99kg/m ²	26,74	23,27	17,09		
≥30kg/m ²	11,76	6,84	5,02		
Consommation de tabac				0,0008	0,003
Fumeur	11,59	10,27	9,31		
Consommation d'alcool				<0,0001	<0,0001
Abstinent	4,34	4,22	5,20		
<14g/j	71,80	72,35	74,83		
≥14g/j	23,86	23,44	19,97		
Régime alimentaire				<0,0001	<0,0001
Omnivore	99,62	99,14	92,73		
Végétalien	0,00	0,00	1,71		
Végétarien	0,38	0,86	5,56		

Abréviations : IMC : indice de masse corporelle ; T, tertile

¹ Les valeurs présentées sont des pourcentages ou des moyennes avec écarts types

² P values proviennent de tests de contraste linéaire et des tests du χ^2 de Mantel-Haenszel

³ Une question du questionnaire étant optionnelle, il existe des valeurs manquantes

b/ Résultats des étapes intermédiaires

Étape 0

L'étape 0 consistait à minimiser les écarts au régime observé en respectant les contraintes nutritionnelles et les contraintes proposant un seuil maximum d'items, sous-groupes et groupes d'aliments « consommables ». L'objectif de cette étape était d'obtenir un prix de régime permettant de couvrir l'ensemble des besoins nutritionnels tout en restant le plus proche possible de l'observé.

On remarque que pour respecter les contraintes nutritionnelles, les modifications proposées diffèrent selon les tertiles de score provégétarien. Le Tableau 30 montre une plus grande consommation de protéines d'origine végétale, mais d'une amplitude différente dans les trois tertiles. On remarque aussi une réduction des protéines animales dans les deux tertiles les moins végétalisés, alors que dans le T3 une faible augmentation est observée. Les impacts sur l'environnement de la production des régimes de l'étape 0 sont réduits très faiblement par rapport aux régimes observés, sauf pour le troisième tertile (tertile le plus provegetarien). Le PANDiet à la fin de cette étape et ses sous-scores sont plus élevés que dans le régime observé. La densité énergétique du régime obtenue après l'étape 0 est légèrement plus faible. Le prix du régime moyen des participants à l'étape 0 est souvent réduit par rapport aux régimes observés. Néanmoins, pour 2711 participants (soit 22,2% de l'échantillon) le prix du régime de l'étape 0 est plus élevé que celui du régime observé. Pour ces 2711 participants, le prix maximum imposé dans les contraintes des étapes suivantes sera celui de cette étape 0.

Concernant la composition des régimes représentée dans la Figure 15 et Figure 16, nous observons que les régimes obtenus après l'étape 0 sont en moyenne plus riches en aliments d'origine végétale. Ils sont composés de moins de viandes de ruminants et fromages et plus de viandes de porc ou de volailles. Concernant les aliments gras et sucrés, on observe des substitutions entre groupes, avec par exemple moins de sucreries, mais plus de soda dans le régime de l'étape 0 par rapport aux régimes observés.

Tableau 30: Caractéristiques des régimes¹ observés, après l'étape 0 et l'étape 1 pour la population totale (N=12166) et par tertile, NutriNet-Santé 2014

	Total (N=12166)			T1 (N=4079)			T2 (N=4166)			T3 (N=3921)		
	Observé	Etape0	Etape1	Observé	Etape0	Etape1	Observé	Etape0	Etape1	Observé	Etape0	Etape1
Apport énergétique (kcal/j)	2205,3 (3,9)	2147,1 (3,1)	2107,2 (3,3)	2252,6 (6,6)	2166,5 (5,3)	2136 (5,7)	2173,3 (6,7)	2126,7 (5,4)	2087,9 (5,8)	2188,4 (6,8)	2147,7 (5,5)	2096,8 (5,9)
Masse du régime (en g)	1950 (5)	1990 (3)	1568 (2)	1967 (9)	1995 (4)	1572 (3)	1924 (9)	1977 (4)	1571 (3)	1957 (9)	1999 (5)	1560 (3)
Ratio des aliments bios (/1)	0,3 (0)	-	0,01 (0)	0,2 (0)	-	0,01 (0)	0,27 (0)	-	0,01 (0)	0,44 (0)	-	0,01 (0)
Protéines animales	68,9 (0,3)	60,8 (0,2)	7,2 (0)	86,3 (0,4)	68,6 (0,2)	7,2 (0)	68,4 (0,4)	61,2 (0,3)	7,1 (0)	50,9 (0,4)	52,3 (0,3)	7,4 (0)
Protéines végétales	31,4 (0,1)	36,7 (0,1)	55,4 (0,1)	26,5 (0,2)	34,6 (0,1)	55,7 (0,1)	30,3 (0,2)	36 (0,1)	55,2 (0,1)	37,6 (0,2)	39,6 (0,1)	55,1 (0,1)
PANDiet (/100)	64,8 (0,1)	73,22 (0,05)	81,04 (0,02)	61,16 (0,1)	71,51 (0,08)	80,75 (0,03)	64,8 (0,1)	73,53 (0,08)	81,13 (0,03)	68,66 (0,11)	74,72 (0,08)	81,24 (0,03)
Sous-score de modération du PANDiet (/100)	45,2 (0,1)	59,33 (0,1)	74,17 (0,03)	38,64 (0,21)	56,6 (0,17)	73,74 (0,06)	45,41 (0,21)	60,21 (0,17)	74,39 (0,06)	52,04 (0,22)	61,33 (0,17)	74,39 (0,06)
Sous-score d'adéquation du PANDiet (/100)	84,4 (0,1)	87,11 (0,03)	87,9 (0,02)	83,68 (0,11)	86,43 (0,04)	87,77 (0,04)	84,19 (0,11)	86,85 (0,05)	87,86 (0,04)	85,28 (0,12)	88,11 (0,05)	88,09 (0,04)
Densité énergétique (kcal/100g)	118,21 (0,23)	108,7 (0,1)	135,04 (0,2)	120,11 (0,4)	109,4 (0,2)	136,46 (0,34)	118,17 (0,4)	108,5 (0,2)	133,53 (0,35)	116,23 (0,41)	108,2 (0,2)	135,09 (0,35)
pRecipe	0,757 (0,004)	0,732 (0,003)	0,072 (0)	0,904 (0,006)	0,813 (0,005)	0,073 (0)	0,751 (0,006)	0,736 (0,005)	0,071 (0)	0,606 (0,006)	0,641 (0,005)	0,073 (0)
Énergie (MJ/j)	19,34 (0,06)	18,8 (0,04)	2,48 (0,01)	21,82 (0,1)	19,82 (0,08)	2,47 (0,01)	19,21 (0,1)	18,78 (0,08)	2,43 (0,01)	16,83 (0,1)	17,73 (0,08)	2,53 (0,01)
Émissions de gaz à effet de serre (kgCO _{2eq} /j)	4,47 (0,02)	4,41 (0,02)	0,34 (0)	5,47 (0,04)	4,92 (0,03)	0,34 (0)	4,44 (0,04)	4,43 (0,03)	0,33 (0)	3,44 (0,04)	3,84 (0,03)	0,35 (0)
Surface (m ² /j)	11,7 (0,06)	10,99 (0,05)	1,15 (0)	13,91 (0,1)	12,26 (0,08)	1,16 (0,01)	11,6 (0,1)	11,06 (0,08)	1,13 (0,01)	9,45 (0,1)	9,58 (0,08)	1,16 (0,01)
Prix (€/j)	8,38 (0,02)	7,07 (0,01)	5,07 (0,01)	8,41 (0,04)	7,09 (0,02)	5,09 (0,01)	8,16 (0,04)	7,01 (0,02)	5,07 (0,01)	8,58 (0,04)	7,11 (0,02)	5,07 (0,01)

¹ Les valeurs sont des moyennes avec écarts types

Étape 1

Lors de l'étape 1, l'objectif était de réduire les impacts sur l'environnement de la production des régimes alimentaires en respectant les contraintes nutritionnelles, les contraintes sur les quantités maximums d'items consommables, de groupes et sous-groupes d'aliments.

Cette première étape d'optimisation induit d'importantes modifications de structure des régimes. On observe, dans le Tableau 30 une réduction très importante des quantités de protéines apportées par les régimes et notamment des protéines d'origine animale. La contribution des aliments biologiques dans les régimes est presque nulle. Les régimes sont plus légers et apportent moins de calories, ce qui les rend plus denses en énergie. Néanmoins par les contraintes nutritionnelles, les deux sous-scores du PANDiet sont plus élevés que pour l'observé, et en particulier le sous-score de modération. Les prix moyens des régimes de l'étape 1 sont plus bas que ceux des régimes observés. Enfin, comme souhaité, nous observons une nette réduction des trois indicateurs environnementaux et du pReCiPe.

Les structures des régimes dans les trois tertiles sont très proches. On note une réduction de la contribution (en pourcentage du total de la masse du régime) de presque tous les groupes (en comparaison avec les régimes observés) excepté pour les légumes, les féculents raffinés et complets, les aliments à base de soja, le poisson, les sucreries et les snacks, dont les contributions augmentent.

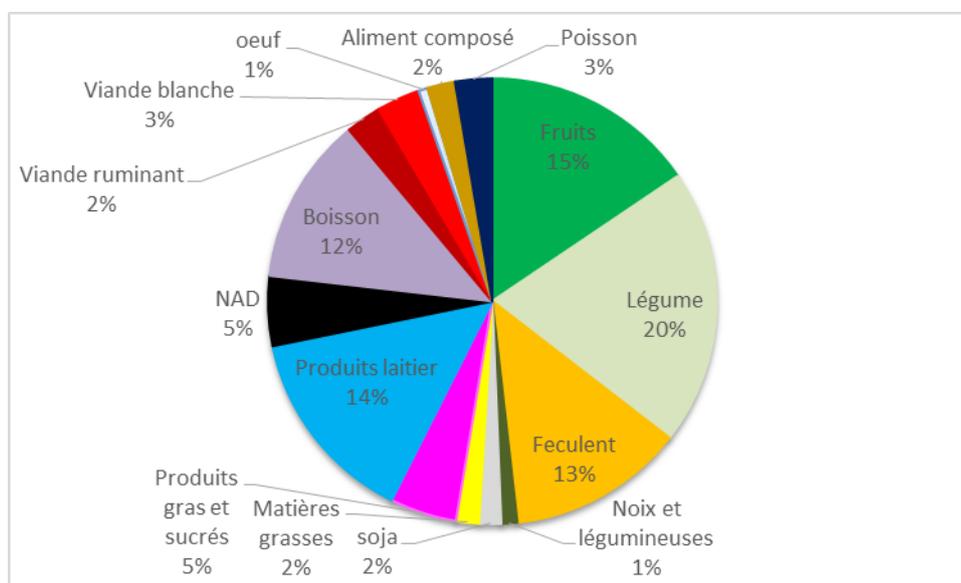


Figure 15: Structure moyenne des régimes observés, NutriNet-Santé 2014 (N=12166)

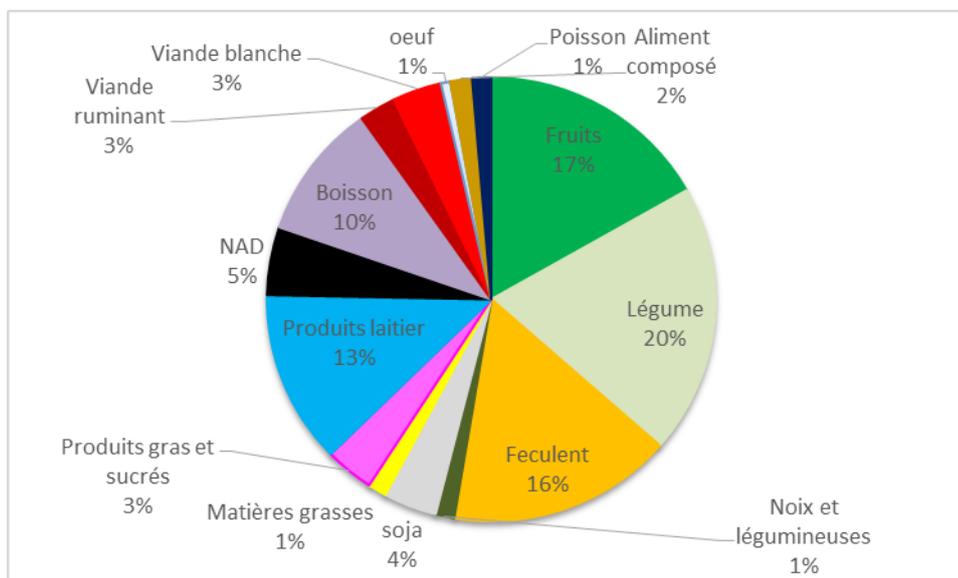


Figure 16: Structure moyenne des régimes après l'étape 0, NutriNet-Santé (N=12166)

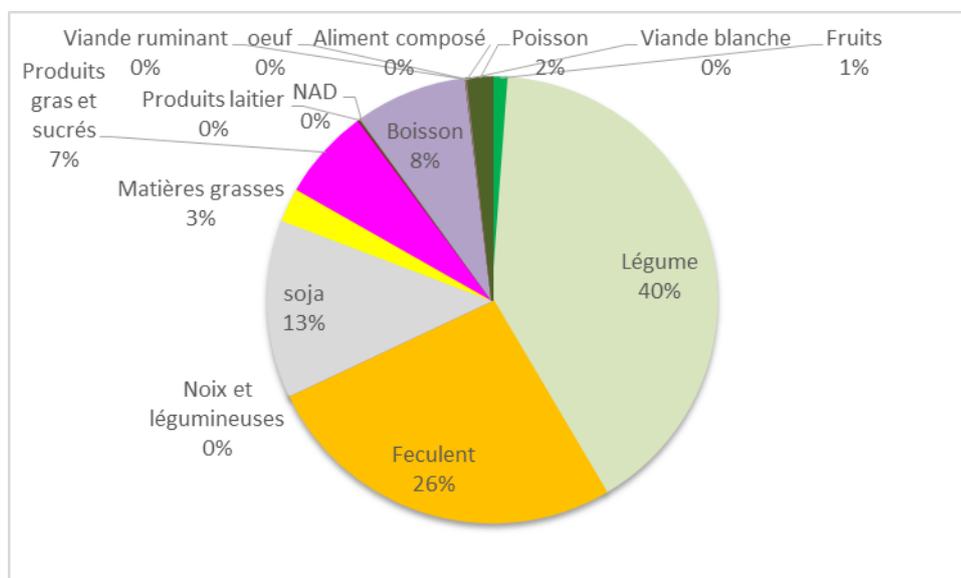


Figure 17: Structure moyenne des régimes après l'étape 1, NutriNet-Santé (N=12166)

Étape 2

Lors de l'étape 2, l'objectif était de maximiser la quantité d'aliments issus de l'agriculture biologique dans les régimes tout en respectant les contraintes précédentes et une contrainte supplémentaire consistant à ne pas dépasser un seuil de dégradation de l'amélioration du pReCiPe obtenu lors de l'étape 1. C'est ainsi qu'à partir de l'étape 2, nous obtenons des solutions distinctes entre scénarios.

Les principales caractéristiques des régimes sont présentées par scénario dans le Tableau 31. On note qu'après cette étape, presque l'ensemble des régimes, et ce quel que soit le scénario, est composé d'aliments issus de l'agriculture biologique.

Tableau 31: Caractéristiques des régimes¹ après l'étape 2 dans les 5 scénarios (N=12166), NutriNet-Santé 2014

	Scénario 0.1	Scenario 0.2	Scénario 0.3	Scénario 0.5	Scénario 0.75
Apport énergétique (kcal/j)	2110.7 (3.3)	2130.1 (3.3)	2155.1 (3.3)	2193.8 (3.2)	2206.4 (3.2)
Masse du régime (en g)	2510 (3)	2773 (3)	2893 (4)	2978 (3)	2979 (4)
Contribution des aliments biologiques (en % de la masse)	0.97 (0)	0.99 (0)	1 (0)	1 (0)	1 (0)
Protéines animales	13.3 (0.1)	25 (0.1)	32.7 (0.1)	41.1 (0.2)	43.1 (0.2)
Protéines végétales	50.9 (0.1)	46.8 (0.1)	44.3 (0.1)	42.8 (0.1)	42.5 (0.1)
PANDiet	80.24 (0.03)	79.92 (0.04)	79.3 (0.05)	78.58 (0.05)	78.29 (0.05)
Sous-score de modération du PANDiet	71.9 (0.05)	71.88 (0.08)	70.38 (0.09)	68.98 (0.11)	68.35 (0.11)
Sous-score d'adéquation du PANDiet	88.59 (0.02)	87.96 (0.02)	88.22 (0.02)	88.18 (0.02)	88.23 (0.02)
Densité énergétique (kcal/100g)	85.13 (0.15)	77.7 (0.13)	75.32 (0.12)	74.35 (0.11)	74.72 (0.11)
pRecipe	0.141 (0)	0.21 (0.001)	0.266 (0.001)	0.365 (0.002)	0.417 (0.002)
Énergie (MJ/j)	4.93 (0.01)	6.45 (0.02)	7.68 (0.03)	9.6 (0.04)	10.3 (0.04)
Émissions de gaz à effet de serre (kgCO ₂ eq/j)	0.51 (0)	0.87 (0)	1.17 (0.01)	1.63 (0.01)	1.9 (0.01)
Surface (m ² /j)	2.39 (0.01)	3.5 (0.01)	4.4 (0.02)	6.05 (0.03)	6.92 (0.03)
Prix (€/j)	7.91 (0.02)	8.25 (0.02)	8.35 (0.02)	8.54 (0.02)	8.58 (0.02)

¹ Les valeurs sont des moyennes avec écarts-types

c/ Résultats en fin d'optimisation

Caractéristiques des régimes optimisés à l'étape 3 selon les scénarios

À la fin du processus d'optimisation, nous obtenons une solution de régime alimentaire individuel pour chacun des cinq scénarios. Les courbes de la Figure 18 présentent plusieurs caractéristiques des régimes (PANDiet, prix, densité énergétique, contribution du bio, pReCiPe et rapport protéines animales sur le total des protéines) observés et après l'étape 3 pour les 5 scénarios et par tertile de score provégétarien. Nous observons des évolutions vers des caractéristiques plus durables de plus en plus importantes du scénario le plus conservateur (scénario 0.75) au scénario le plus disruptif (scénario 0.1), à l'exception du prix pour lequel de faibles variations s'observent. Plus les scénarios sont disruptifs, plus les différences entre tertiles de score provégétarien s'amoinissent. Nous observons également qu'à partir du scénario 0.3, c'est le régime moyen du T3 (tertile le plus provégétarien) qui est le plus dense en énergie. Le prix des régimes est assez constant, malgré une sensible diminution dans les scénarios les plus disruptifs.

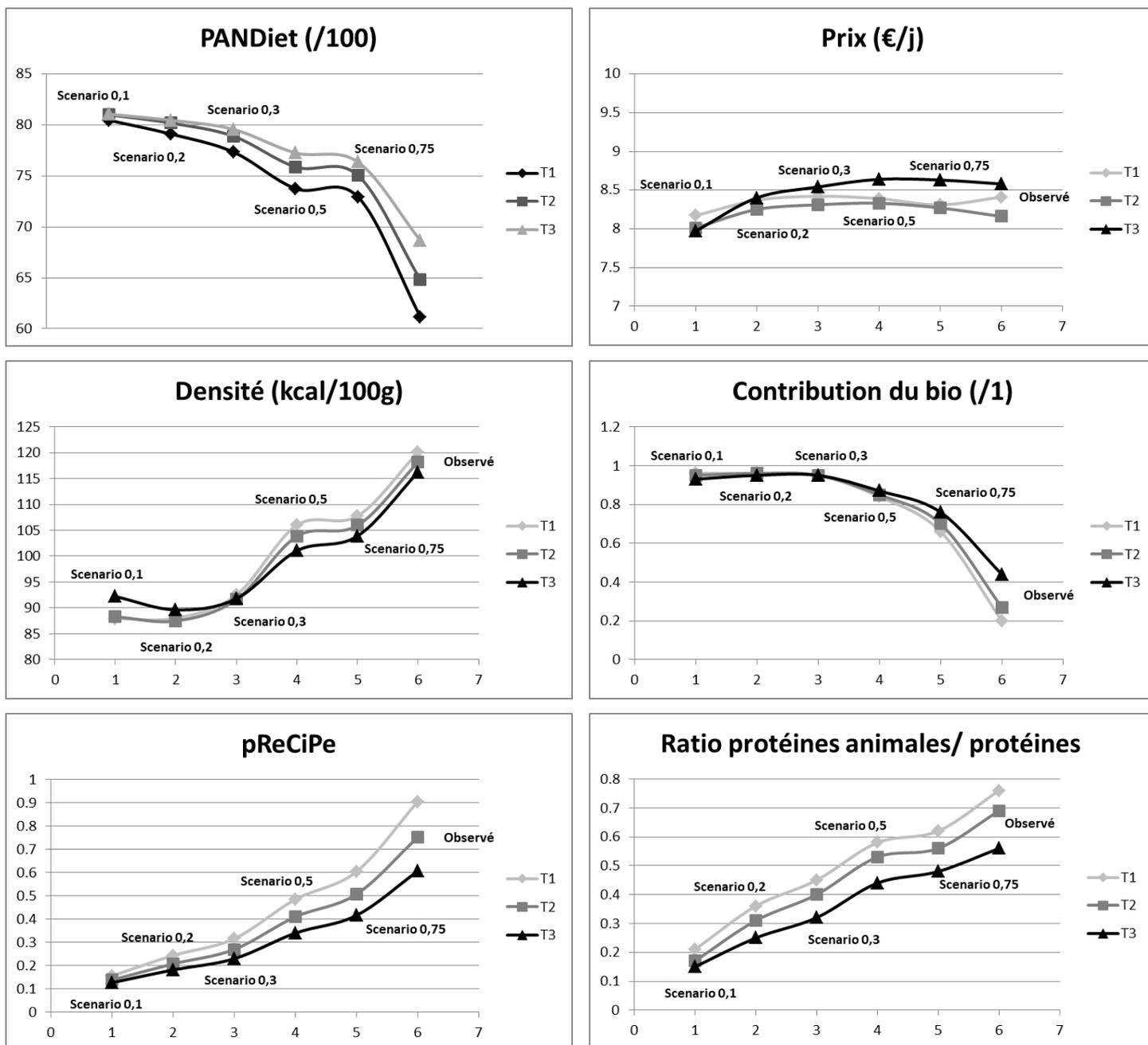


Figure 18: PANDiet, prix, densité énergétique, contribution du bio, pReCiPe et rapport protéique observé et optimisé pour les 5 scénarios et selon les tertiles de score provégétarien

Les valeurs de ces caractéristiques, ainsi que celles d'autres indicateurs, sont présentées dans le Tableau 32, pour l'échantillon total.

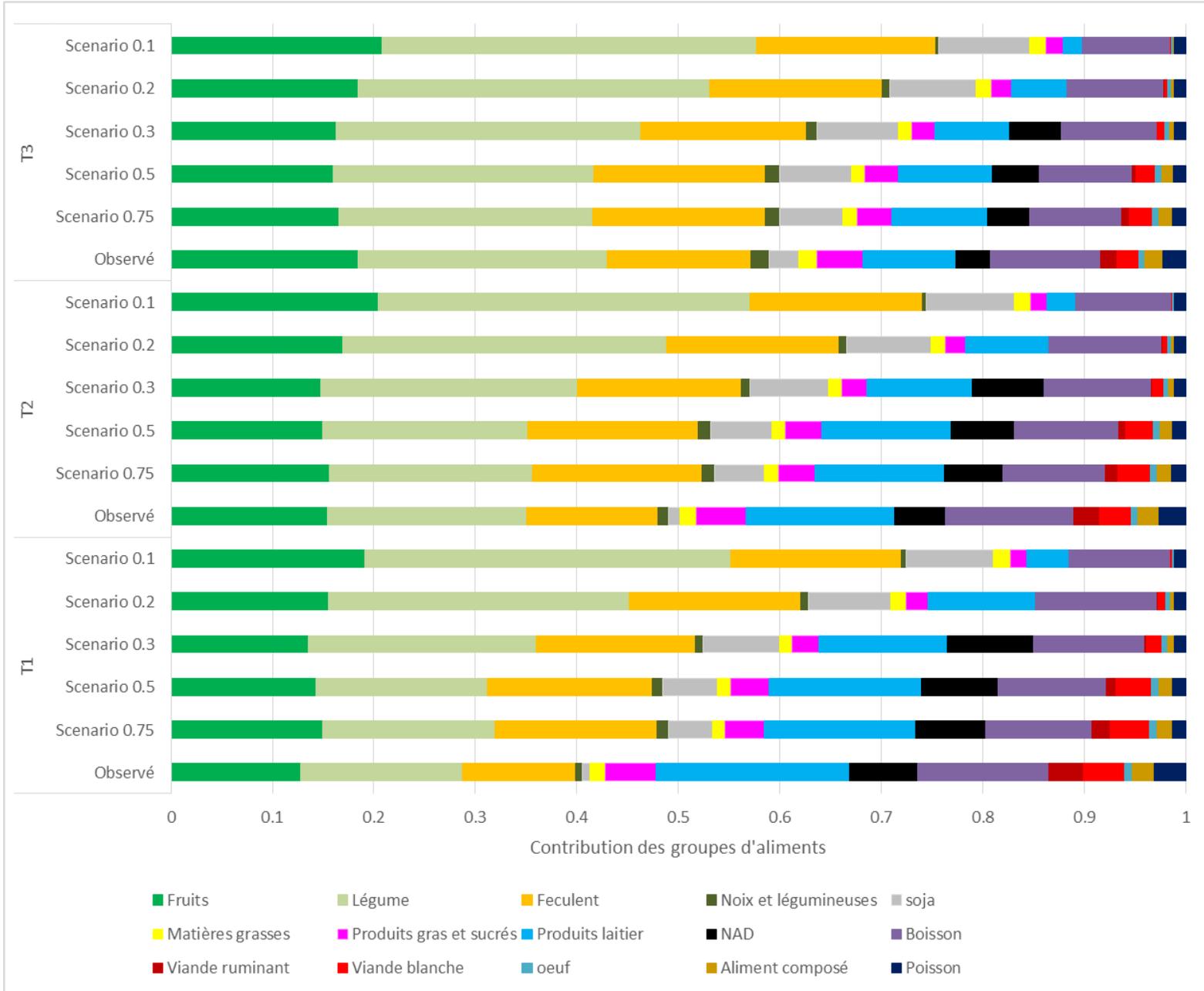
Tableau 32: Caractéristiques des régimes optimisés et par scénario après la dernière étape d'optimisation (étape 3), NutriNet-Santé 2014, (N=12166)

	Scénario 0.1	Scénario 0.2	Scénario 0.3	Scénario 0.5	Scénario 0.75
Apport énergétique (kcal/j)	2107.8 (3.3)	2111.2 (3.3)	2118.6 (3.3)	2133.3 (3.2)	2137.4 (3.2)
Masse du régime (en g)	2379 (3)	2411 (3)	2323 (3)	2077 (3)	2041 (3)
Contribution des aliments biologiques (en % de la masse)	0.95 (0)	0.95 (0)	0.95 (0)	0.85 (0)	0.7 (0)
Protéines animales	12.3 (0.1)	23.4 (0.1)	31.6 (0.1)	46 (0.2)	51.4 (0.2)
Protéines végétales	54.1 (0.1)	49.1 (0.1)	45.7 (0.1)	40.3 (0.1)	38.9 (0.1)
PANDiet	80.84 (0.02)	79.91 (0.03)	78.58 (0.04)	75.6 (0.05)	74.74 (0.05)
Sous-score de modération du PANDiet	72.42 (0.05)	71.49 (0.06)	69.61 (0.08)	64.38 (0.1)	62.54 (0.1)
Sous-score d'adéquation du PANDiet	89.27 (0.02)	88.33 (0.02)	87.56 (0.02)	86.81 (0.03)	86.94 (0.03)
Densité énergétique (kcal/100g)	89.42 (0.15)	88.34 (0.14)	91.96 (0.14)	103.68 (0.14)	105.91 (0.15)
Recipe	0.141 (0)	0.212 (0.001)	0.273 (0.001)	0.413 (0.002)	0.511 (0.002)
Énergie (MJ/j)	5.16 (0.01)	7.1 (0.02)	8.6 (0.03)	11.86 (0.04)	13.64 (0.04)
Émissions de gaz à effet de serre (kgCO _{2eq} /j)	0.55 (0)	0.93 (0)	1.28 (0.01)	2.18 (0.01)	2.84 (0.01)
Surface (m ² /j)	2.34 (0.01)	3.45 (0.01)	4.38 (0.02)	6.46 (0.03)	7.89 (0.04)
Prix (€/j)	8.05 (0.02)	8.34 (0.02)	8.42 (0.02)	8.45 (0.02)	8.4 (0.02)

¹ Les valeurs sont des moyennes avec écarts-types

Structure des régimes selon les scénarios

La Figure 19 présente la contribution en grammes des principaux groupes d'aliments contenus dans les régimes alimentaires. Nous observons que plus les scénarios sont disruptifs, plus les contributions des fruits, des légumes, des féculents et du soja augmentent. À l'opposé, les consommations de viandes, produits laitiers, œufs, des aliments composés, des aliments gras et sucrés ou salés et du poisson diminuent. Les boissons chaudes ou sans sucre disparaissent des régimes à partir du scénario 0.2. La contribution des noix et des légumineuses augmente dans les scénarios les plus conservateurs, mais elle diminue ensuite. Nous observons que les différences de structure des régimes entre tertiles sont plus faibles lorsque les scénarios sont plus disruptifs. Finalement, les évolutions de consommation des groupes d'aliments vont dans le même sens pour tous les tertiles mais les amplitudes sont différentes.



NAD : Boissons non ou très peu sucrées

Figure 19: Structure des régimes observés et après l'étape 3 selon 5 scénarios par tertile de score provégétarien

Tension entre les dimensions alimentation biologique et pReCiPe

Dans cette dernière partie, nous avons souhaité étudier les tensions qui pourraient exister entre l'objectif de diminuer les impacts environnementaux (résumé dans le pReCiPe) et l'objectif d'augmenter la contribution des aliments issus de l'agriculture biologique dans le régime.

Pour cela, nous avons tracé la courbe du ratio d'aliments biologiques dans le régime en fonction du pReCiPe, Figure 20.

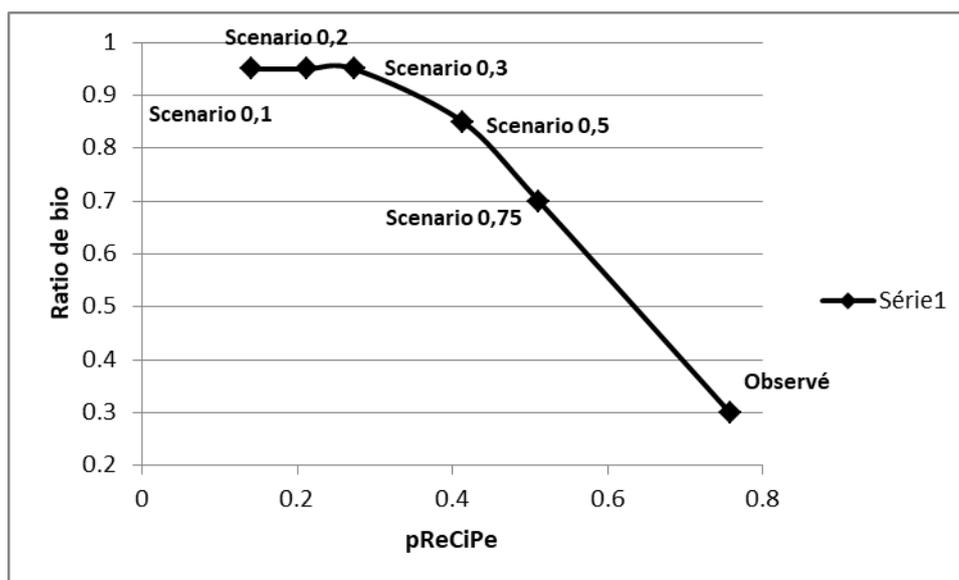


Figure 20: Ratio des aliments issus de l'agriculture biologique en fonction du pReCiPe du régime obtenu après l'étape 3 dans les 5 scénarios et dans le régime observé

Sur la droite, nous observons un point d'inflexion entre les pReCiPe de 0,2 à 0,3, avec pour les pReCiPe inférieurs à 0,3 une stabilisation voir une très légère diminution de la contribution des aliments biologiques dans le régime. Ce point d'inflexion montre une opposition entre le désir de diminuer les impacts environnementaux et celui d'augmenter la contribution des aliments issus de l'agriculture biologique dans le régime. Cette petite opposition n'apparaît que pour des pReCiPe déjà très faible.

3) Interprétation et discussion des résultats

a/ Résumé des principaux résultats

Ce travail a permis d'identifier des solutions (régimes optimisés), par une méthode d'optimisation, pour que les régimes alimentaires répondent aux principaux besoins nutritionnels, en réduisant les impacts de leur production sur l'environnement, à un prix proche ou inférieur à ce qui est dépensé actuellement et en évitant de bouleverser les habitudes alimentaires. Nous avons présenté les résultats d'optimisation individuelle par tertile de score provégétarien afin de pouvoir identifier de

potentielles différences de modifications à apporter en fonction du niveau de végétalisation du régime de départ.

Nos résultats montrent que pour atteindre ces objectifs, il est nécessaire d'augmenter les consommations de fruits et légumes, de féculents et de soja et de diminuer les aliments d'origine animale ainsi que les aliments gras et sucrés ou salés. Les modifications sont les mêmes pour tous les tertiles provégétariens, sauf pour le poisson, mais les amplitudes des modifications diffèrent.

b/ Discussion sur les résultats des régimes intermédiaires

Étape 0

Lors de l'étape 0, nous souhaitons obtenir des régimes alimentaires proches des régimes observés (minimisation des écarts à l'observé) et répondant aux contraintes nutritionnelles et de quantités d'items et de groupes d'aliments maximums. Nous observons que les régimes obtenus à la fin de cette étape sont légèrement plus végétalisés : ils contiennent en gramme un peu moins de poissons et produits laitiers et un peu plus de viandes. Les diminutions les plus importantes concernent en particulier les boissons sucrées et les aliments gras et sucrés. Ceci peut s'expliquer par les contraintes nutritionnelles incluses, limitant l'apport en sucres simples et en matières grasses. Sur des données représentatives de la population française (enquête INCA2), des chercheurs ont optimisé les régimes afin qu'ils puissent répondre aux recommandations nutritionnelles. Les solutions obtenues contenaient, par rapport à l'observé, plus de fruits, légumes, graines, légumineuses, fruits secs et noix, produits laitiers frais et poissons et moins de viande, fromage et snacks salés (255). On note un désaccord entre les résultats de cette étude et ceux que nous avons obtenu, sur l'évolution de la consommation de poissons. Ce désaccord peut s'expliquer par les contraintes que nous avons ajoutées pour que les régimes optimisés ne puissent pas contenir plus de deux portions de poissons par semaine, dont pas plus d'une portion de poissons gras. Cette contrainte permettait de tenir compte des enjeux pour la biodiversité et la toxicologie de la consommation de poissons.

Les régimes obtenus au terme de cette étape 0 sont pour la plupart à l'origine d'une augmentation d'impacts pour l'environnement par rapport aux régimes observés. D'autres études sur des régimes optimisés ou observés montrent qu'en effet un régime de bonne qualité nutritionnelle n'apporte pas toujours des bénéfices pour l'environnement (140,141).

Étape 1

Dans cette étape, nous avons souhaité diminuer les impacts sur l'environnement des régimes alimentaires sous contraintes nutritionnelles, de groupes alimentaires et de prix. Ainsi, les réductions obtenues des trois indicateurs environnementaux que sont les émissions de gaz à effet de serre, le

besoin en énergie et l'occupation des sols sont bien marquées. En moyenne, le score du pReCiPe après l'étape 1 est plus de dix fois moins élevé que pour le régime observé. D'autres études ont aussi documenté des solutions de régimes diminuant très fortement certains impacts environnementaux (les émissions de gaz à effet de serre ou le pReCiPe) tout en respectant un certain nombre de contraintes nutritionnelles (112,137). Néanmoins, les solutions après l'étape 1 sont très éloignées des habitudes alimentaires et ne seraient donc peut-être pas acceptables par la majeure partie de la population. En effet, au terme de cette étape, nous observons la disparition ou une réduction radicale d'un grand nombre de groupes d'aliments très couramment consommés.

Par l'introduction des contraintes nutritionnelles, nous constatons que le score du PANDiet est bien plus élevé après l'étape 1, mais la densité énergétique des régimes est plus élevée pour les trois tertiles de score provégétarien par rapport aux régimes observés. En effet, par la quasi-disparition des boissons chaudes, la masse du régime après l'étape 1 est beaucoup plus faible par rapport à l'observé, ce qui induit une densité énergétique des régimes plus élevée, malgré l'augmentation très importante de la contribution des fruits et légumes.

Étape 2

L'étape 2 avait pour objectif de maximiser la contribution des aliments biologiques dans les régimes en respectant les contraintes nutritionnelles, de composition, de prix et de limiter la dégradation de l'amélioration du pReCiPe obtenue après l'étape 1. Un des principaux résultats de cette partie est que nous sommes parvenus à obtenir des solutions de régimes contenant presque exclusivement des aliments issus de l'agriculture biologique, à un prix proche du régime observé et ce en respectant les contraintes nutritionnelles introduites dans le problème.

Solutions optimisées de régimes alimentaires finaux

Dans une dernière étape, nous avons utilisé la quantité d'aliments issus de l'agriculture biologique obtenue après l'étape 2 ainsi que du pReCiPe pour contraindre les solutions. La fonction objectif consistait à minimiser la somme des écarts à l'observé standardisée afin que nos solutions soient plus proches des habitudes observées et donc plus acceptables (selon notre hypothèse). Les solutions obtenues dépendent du caractère plus ou moins conservateur des scénarios. La réduction des émissions de gaz à effet de serre obtenue varie de 88% à 36%, selon les scénarios. En 2050, afin de respecter le facteur 4 de diminution des émissions de gaz à effet de la France, un Français ne pourra pas émettre en un an plus de 1,9 tonne de $\text{kgCO}_{2\text{eq}}$ (256). Dans le scénario le plus conservateur (scénario 0.75), les émissions de gaz à effet de serre liées à la production des régimes seront d'environ 1,04 tonne de $\text{kgCO}_{2\text{eq}}$. Sachant que nous ne comptons pas les phases de transformation et de

transport, ce scénario sera peut-être insuffisant pour répondre à l'objectif de l'accord de Paris, d'autant plus que d'autres activités (transport, chauffage, etc.) sont également à l'origine d'émissions de gaz à effet de serre et donc à prendre en compte. Les émissions moyennes de gaz à effet de serre sur un an des autres scénarios vont de 0,80 tonne de $\text{kgCO}_{2\text{eq}}$ par an à 0,20 tonne de $\text{kgCO}_{2\text{eq}}$ par an. Ces scénarios pourront être ainsi proposés pour répondre à l'objectif climatique. Le choix d'un des scénarios dépendra des contributions aux émissions de gaz à effet de serre des autres activités. La réduction des surfaces occupées pour la production alimentaire varie de 80% à 41% alors que celle de la demande en énergie varie de 75% à 47%. Les réductions plus faibles de la consommation d'énergie peuvent s'expliquer par la forte proportion de fruits et légumes dont la production peut nécessiter plus d'énergie que pour d'autres groupes d'aliments. Le modèle de production en agriculture biologique peut néanmoins permettre d'en consommer moins par rapport à un modèle de production conventionnelle (144).

Pour la plupart des groupes d'aliments, les tendances de consommation vont dans le même sens et c'est l'amplitude qui varie selon le scénario. Nous notons l'exception des noix et des légumineuses pour laquelle la consommation augmente dans les scénarios les plus conservateurs et diminue dans les scénarios les plus disruptifs, au profit du soja. Les produits à base de soja sont souvent très transformés (257) et on peut s'interroger sur la pertinence pour la santé, de conseiller ce type de produits plutôt que des légumineuses ou des noix brutes. De plus, la France est dépendante des importations de soja des pays d'Amérique du Sud où sa production est à l'origine de déforestation, et de nombreuses pollutions à cause des nombreux pesticides utilisés (258). En utilisant d'autres paramètres environnementaux, de marché économique ou de degrés de transformation des aliments, il est probable que nous aurions abouti à des solutions différentes. Il serait donc intéressant, de confronter les solutions de ce travail au regard du contexte, du fonctionnement et de l'évolution des filières agricoles françaises. De même, nos solutions de régimes contiennent une quantité d'aliments issus de l'agriculture biologique non négligeable. Aujourd'hui, nous pouvons penser qu'il s'agit d'une solution théorique et son application nécessiterait de modifier profondément les systèmes agricoles. Actuellement, les filières de production d'aliments issus de l'agriculture biologique sont trop faibles pour couvrir les besoins de toute la population (106,108). Préconiser une augmentation de la consommation d'aliments biologiques nécessite de réfléchir à comment organiser l'amont. Finalement, la consommation de viande de ruminants est absente de la plupart des solutions dans le cas des scénarios les plus disruptifs. Alors que la consommation moyenne des produits laitiers n'est que réduite par rapport à l'observé. Il serait pertinent d'évaluer si le cheptel nécessaire pour la production de cette quantité de produits laitiers et en adéquation avec les niveaux de consommation des viandes de ruminants dans chacun des scénarios. Certains auteurs

soulignent aussi l'intérêt de l'élevage de ruminants dans certaines zones non cultivables, comme en montagne, et pour les cycles de production en polyculture. Ces éléments n'ont pas été pris en compte dans l'écriture du problème d'optimisation bien qu'il soit intéressant à étudier. Certains auteurs ont tenté de tenir compte des coproductions dans l'écriture du problème d'optimisation (259), en se basant sur le nombre de veaux nécessaire pour produire une quantité moyenne de lait et la viande ainsi produite. Ils aboutissent alors à une réduction moindre de la consommation de viande de ruminant dans les scénarios qui tiennent compte de la biodisponibilité des nutriments et des liens de co-production (259). Néanmoins, les résultats obtenus dépendent beaucoup du coefficient utilisé pour lier la production de lait à celle de la viande, et donc du modèle de production de référence. De plus, ils n'ont pas de sens à l'échelle individuelle.

La question de l'acceptabilité doit également être soulevée. En effet, nous avons émis dans ce travail l'hypothèse selon laquelle plus les solutions de régimes sont proches des régimes observés plus elles seront acceptables. Néanmoins, une étude en neuroscience montre que la présentation de différents aliments n'active pas les mêmes zones du cerveau et ainsi induirait des comportements alimentaires différents (260). Ainsi, modifier la consommation de certains aliments lorsqu'ils ont une valeur affective ou culturelle forte pourrait certainement être moins acceptable. Dans l'écriture de la fonction objectif de réduction des écarts à la consommation, nous privilégions beaucoup de petites modifications. L'usage de la valeur absolue plutôt que du carré aurait apporté d'autres solutions privilégiant de grosses modifications, mais en nombre restreint. Il serait intéressant de comparer les solutions obtenues avec les deux fonctions objectifs.

Finalement, l'étude des potentiels conflits entre la contribution des aliments issus de l'agriculture biologique et la réduction des impacts environnementaux montrent que cette opposition apparaît uniquement pour des réductions extrêmes du pReCiPe, et restent d'ampleur faible. Il semble donc tout à fait possible de réduire les émissions de gaz à effet de serre, la demande en énergie et l'occupation des sols tout en intégrant des aliments biologiques dans son régime.

Forces et faiblesses de l'étude

Notre étude a certaines limites que nous soulignons dans cette partie. Tout d'abord nous nous basons sur des régimes observés au sein d'une population de volontaires ayant des caractéristiques et comportements alimentaires propres à leur caractère de volontaires. Ainsi, nos solutions sont applicables pour cet échantillon. Elles nécessiteraient d'être questionnées si elles devaient être généralisées à l'ensemble de la population. De plus, les solutions que nous avons obtenues ont été influencées par les choix méthodologiques de fonctions objectifs, de contraintes, de scénarios et de

procédure. Néanmoins, le choix de présenter 5 scénarios nous permet d'imaginer une partie des solutions que nous aurions obtenues en faisant d'autres scénarios. De plus, nous avons travaillé sur un peu plus de 200 items ce qui est peu par rapport aux répertoires alimentaires et aux produits alimentaires disponibles en France, d'autant plus que l'usage de l'optimisation a tendance à réduire la diversité des régimes alimentaires. Aussi, il aurait été intéressant de pouvoir ajouter d'autres dimensions de l'alimentation dans notre problème, relative à la toxicologie ou à d'autres impacts environnementaux par exemple. Néanmoins, à notre connaissance c'est la première étude en France qui considère d'autres impacts environnementaux que les émissions de gaz à effet de serre. Aussi, nous n'avons pas pu distinguer la composition des aliments en fonction de leur mode de production, saisonnalité ou lieux d'achats. Enfin, il aurait été très intéressant de tester la validité de nos solutions en terme agronomique, en testant, par exemple les relations entre coproduits. Ce qui aurait pu également apporter des éléments de réponses sur les systèmes alimentaires nécessaires à la mise en place de ces régimes. Enfin, il aurait été pertinent de tester la faisabilité de nos solutions en sollicitant des diététiciens pour réaliser des menus à partir de nos solutions. Ce qui nous aurait permis de les tester auprès de volontaires. Cela peut constituer une perspective de ce travail.

Notre étude apporte de nouveaux éléments dans le domaine de recherche utilisant l'optimisation pour l'identification de régimes alimentaires plus durables, car nous avons pu mener l'optimisation à une échelle individuelle, des régimes alimentaires pour un grand nombre de participants présentant des profils variés. Ce qui nous a permis d'identifier et de distinguer des solutions selon les régimes de départ des participants. La non-représentativité de la population est aussi un atout, car elle donne accès à des profils potentiellement plus durables que ceux de la population générale. Aussi, le processus d'optimisation multicritère et hiérarchique mis en place dans cette étude est original et permet de définir plusieurs objectifs. L'étude des solutions intermédiaires apporte des éléments intéressants pour nos analyses.

VII Discussion générale

1) Résumé des principaux résultats

L'objectif général de cette thèse était d'étudier l'impact sur les individus et sur l'environnement, des régimes alimentaires pour identifier les meilleurs compromis et optimaux de régimes durables, et identifier des leviers d'actions à leur développement. Pour y répondre, nous avons scindé l'objectif général en trois sous-objectifs :

- Identifier par plusieurs approches des régimes alimentaires plus durables au sein de notre cohorte.
- Étudier les associations entre ces comportements alimentaires plus durables et l'évolution de la masse corporelle, la survenue de l'obésité, du surpoids, des cancers et des maladies cardiovasculaires.
- Rechercher des régimes alimentaires optimaux pour la nutrition, l'environnement et le coût économique pour identifier les principales modifications à entreprendre.

Le Tableau 33 résume les principales études, les résultats obtenus et les points de discussion.

Tableau 33: Synthèse des principaux résultats de cette thèse et de leurs points de discussion

Travail	Objectifs	Principaux résultats	Points de discussion
Identification des comportements alimentaires durables : approche climatique	L'objectif est de décrire les régimes observés émettant peu de gaz à effet de serre dans un large échantillon de volontaires, puis de comparer leurs performances nutritionnelles, environnementales et d'accessibilité économique avec celles de régimes observés et émettant plus de gaz à effet de serre.	Les régimes alimentaires émettant le plus de gaz à effet de serre contiennent plus d'aliments d'origine animale, et sont plus caloriques. Peu de différences dans les quantités d'aliments gras et sucrés ou boissons alcoolisées ont été observées entre quintiles. Les régimes à faibles émissions présentent une bonne qualité nutritionnelle. La demande en énergie et l'occupation des sols augmentent avec le niveau d'émissions de gaz à effet de serre. Les volontaires dont le régime émet le moins de gaz à effet de serre sont ceux qui ont la plus forte contribution d'aliments biologiques. Les prix de ces régimes bas carbone sont les plus bas, même après un ajustement sur l'énergie consommée.	<p>Les régimes dont la production est à l'origine de moins d'émissions de gaz à effet de serre sont les plus végétalisés. Néanmoins, nous n'avons pas observé dans notre échantillon de différences sur la consommation d'aliments gras et sucrés ou de soda, qui avaient pu être observées dans d'autres études d'observations. Ces régimes à faible bilan carbone sont moins chers, présentent une bonne qualité nutritionnelle et permettent de réduire la demande en énergie et en sol.</p> <p>Le périmètre d'évaluation de l'impact environnemental des régimes est restreint et basé sur des données recueillies auprès de fermes volontaires ce qui ne permet pas d'écarter un biais de sélection.</p>
Identification des comportements alimentaires durables : approche exploratoire	L'objectif de ce travail est de discriminer plusieurs profils alimentaires selon des indicateurs de durabilité par une approche multidimensionnelle de type PLS et en intégrant les modes de production.	Nous avons identifié six groupes de participants. Le premier groupe (3,9% de l'échantillon) présente un régime non durable riche en viande et produits laitiers, pauvre en fruits et légume. Deux des groupes (17,05% et 27,05%) présentent des régimes avec de forts impacts sur l'environnement, une composition variée, mais riche en aliments d'origine animale. Ils se distinguent sur la qualité nutritionnelle et l'accessibilité économique. L'un rassemble les personnes consommant beaucoup de produits transformés, de sucreries, et produits gras, mais qui accordent un faible budget à l'alimentation. L'autre a une préférence pour le poisson, ou les produits laitiers peu gras et les aliments issus de l'agriculture biologique. Enfin, les trois derniers regroupent les personnes ayant des régimes moins impactant pour l'environnement. Le plus accessible économiquement présente des scores nutritionnels très moyens, et vice-versa. Alors que le	<p>Le niveau de consommation des produits animaux et en particulier de la viande est le principal facteur pour classer les régimes par impact de leur production sur l'environnement. La qualité nutritionnelle des régimes est souvent en opposition avec leur accessibilité économique. Néanmoins, il est possible de trouver un compromis entre les indicateurs intégrés dans l'analyse.</p> <p>Il est très probable que d'autres groupes existent au sein de la population, car notre échantillon n'est pas représentatif de la population française. Le régime identifié comme le meilleur compromis ne doit pas être considéré comme un optimum, car nous sommes sur des données observées.</p>

		groupe intermédiaire semble être un bon compromis entre tous les indicateurs. Ces régimes contiennent peu de viandes, des quantités intermédiaires de produits végétaux et laitiers, 43% des aliments sont biologiques.	
Identification des comportements alimentaires durables : approche par construction d'un indice (le SDI)	L'objectif de notre étude est de proposer un index individuel pour évaluer la durabilité des régimes alimentaires sur de multiples dimensions et le valider.	Nous avons créé un score d'évaluation de la durabilité des régimes alimentaires sur 12 points, nommé le SDI. Au sein de notre échantillon, le SDI est fortement corrélé à tous les sous-scores dont chacun contribue au classement des participants. Le sous-score environnemental est le plus corrélé au SDI alors que le sous-score nutritionnel est le moins corrélé au SDI (les coefficients de Pearson sont de 0,73 et 0,59 respectivement). Les niveaux de consommations alimentaires chez les participants ayant un SDI le plus élevé sont cohérents avec d'autres régimes considérés comme durables et proposés par Afterre2050 ou Livewell2030.	La construction de l'indice SDI se base sur de nombreux choix arbitraires dont nous avons essayé d'évaluer l'impact sur l'indice. L'évaluation du construit montre une bonne cohérence avec d'autres travaux sur la durabilité de l'alimentation. Des différences socio-économiques sont notables entre quintiles de SDI. L'indice pourrait être complété avec des indicateurs sur des composantes peu présentes dans la version actuelle.
Étude des associations entre des comportements alimentaires plus durables et le statut anthropométrique	L'objectif est d'étudier les associations prospectives entre la durabilité des régimes alimentaires, évaluée par un indice holistique, le SDI et le risque d'obésité, de surpoids ou d'augmentation de la masse corporelle au sein d'une population d'adultes français sur un temps de suivi d'environ 3 ans.	Au début de l'étude, des différences importantes de corpulence sont observées par quintiles de SDI. De plus, le modèle mixte principal montre une augmentation significative de la masse corporelle d'environ 160g par an uniquement dans le premier quintile (le moins durable). Aussi, le risque de survenue de l'obésité ou du surpoids est significativement plus bas dans le quintile le plus durable par rapport au moins durable, après de multiples ajustements.	Les résultats sont à mettre en relation avec les différences de consommation des groupes d'aliments entre quintiles, les comportements alimentaires au global, les expositions à des substances impliquées dans le développement d'une obésité ainsi que l'intérêt que certains participants portent aux systèmes alimentaires. Un potentiel biais d'erreur ne peut pas être écarté, car les données anthropométriques sont autodéclarées. L'étude se base sur la masse corporelle alors qu'il existe d'autres indicateurs mesurant de manière plus robuste l'excès de masse dangereux pour la santé. La courte période de suivi a pu limiter l'évaluation des associations.
Étude des associations entre comportements	L'objectif est d'étudier les associations prospectives entre la durabilité des régimes alimentaires, évaluée par un	Nous avons enregistré 640 maladies chroniques incidentes au cours du temps de suivi. Les participants du quartile le plus durable présentent une diminution	Les différences de composition des régimes entre quartiles et la contribution plus forte des aliments issus de l'agriculture biologique dans le régime

alimentaires plus durables et la survenue de maladies chroniques	indice holistique, le SDI et le risque de développer un cancer, des maladies cardiovasculaires ou les deux au sein d'une population d'adultes français sur un temps de suivi d'environ 4 ans.	significative du risque de survenue des maladies chroniques étudiées (cancers et maladies cardiovasculaires). Plus précisément, cette association a été observée pour les cancers dans le modèle le plus ajusté, mais elle n'est pas statistiquement significative pour les maladies cardiovasculaires dans le modèle principal.	pourraient expliquer les résultats. La courte période de suivi peut avoir limité l'évaluation de certains processus cancérigènes ou cardiovasculaires qui auraient pu être observés à long terme.
Recherche des optimums de régime durable	L'objectif est d'identifier les principaux leviers pour que les régimes alimentaires répondent aux besoins nutritionnels, en diminuant les impacts sur l'environnement à un prix proche ou inférieur de ce qui est dépensé actuellement et en diminuant les changements par rapport aux régimes observés. Les résultats sont présentés par niveau de végétalisation des régimes.	Nous avons réalisé cinq scénarios plus ou moins conservateurs par rapport au régime de départ. En allant vers les scénarios les plus disruptifs, les contributions des fruits, légumes, féculents et sojas augmentent alors que celles des aliments d'origine animale et d'aliments gras et sucrés ou salés diminuent. Les évolutions de consommations sont les mêmes, peu importe le niveau de végétalisation du régime de départ, seules les amplitudes sont modifiées. L'étude des tensions entre la consommation d'aliments issus de l'agriculture biologique et les impacts environnementaux de la production montre qu'elles apparaissent uniquement à partir d'une très forte réduction des impacts sur l'environnement et sont très faibles.	Plusieurs scénarios pourraient permettre de répondre aux enjeux environnementaux, tout en restant accessibles économiquement et en couvrant les principaux besoins nutritionnels. Le choix du scénario sera à discuter au regard de l'effort que l'on souhaite faire porter à l'alimentation par rapport aux autres domaines. Néanmoins, les solutions trouvées restent théoriques et nécessiteraient d'être confrontées aux réalités agronomiques. L'étude de leur acceptabilité auprès de la population serait également pertinente pour la suite.

2) Discussion des résultats au regard du contexte actuel

a/ Plusieurs approches pour définir un régime alimentaire durable

Au cours de cette thèse, nous avons identifié à partir des données observées, des connaissances et en nous basant sur la définition de l'alimentation durable de la FAO, des régimes alimentaires plus durables au sein de la cohorte NutriNet-Santé. Nous avons privilégié pour cette identification des indicateurs objectifs comme les émissions de gaz à effet de serre, ou la part du revenu allouée à l'alimentation. Néanmoins, par l'absence de certains indicateurs, nous avons parfois utilisé des indicateurs plus subjectifs. Ce fut le cas en particulier pour la consommation d'aliments issus de l'agriculture biologique que nous avons considéré être un proxy de la préservation de la biodiversité, d'une exposition réduite à certaines substances ou encore à l'écotoxicité.

Un grand nombre d'institutions ont parallèlement à ce travail de thèse proposé des comportements alimentaires durables. En 2016, la FAO avait noté que sur les 83 pays ayant publié des recommandations nutritionnelles pour la population, seuls 4 pays (le Brésil, la Suède, le Qatar et l'Allemagne) avaient pris en compte la durabilité dans leurs recommandations (97). Le Tableau 34 présente les recommandations de ces quatre pays (97). Nous retrouvons des éléments sur la proximité, la limitation de la consommation de viandes rouges et de poissons, des conseils sur le choix d'aliments peu transformés ou allégés en matières grasses et en sucre pour les produits laitiers et enfin des éléments sur l'organisation des prises alimentaires dans le ménage (favoriser le plaisir, la convivialité, le fait soi-même ...).

Tableau 34: Recommandation nutritionnelle et d'alimentation durable de l'Allemagne, le Brésil, la Suède et le Qatar (Source : FAO, 2016)

	Allemagne	Brésil	Suède	Qatar
Fruits et légumes	Choisir de préférence des aliments végétaux. Consommer 5 portions de fruits et légumes quotidiennement.	Manger principalement des aliments végétaux. Choisir des aliments locaux et de saison.	Consommer plein de fruits et légumes (au moins 500g/j). Choisir des légumes contenant des fibres.	Consommer des légumes dans plusieurs plats, dont les snacks. Tenter de consommer entre 2 et 5 portions de légumes et entre 2 et 4 portions de fruits par jour.
Viandes	Manger de la viande avec modération. La viande blanche est meilleure pour la santé que la viande rouge.	Tenter de restreindre vos consommations de viandes rouges.	Manger moins de viandes rouges et de charcuteries (moins de 500g/ semaine). Uniquement une petite quantité doit être transformée.	Choisir les viandes maigres. Limiter les consommations de viandes rouges à 500g/semaine. Éviter les charcuteries.
Produits laitiers	Consommer du lait et des produits laitiers	Les produits laitiers qui ont été sucrés, colorés	Choisir des produits laitiers peu gras, non	Manger quotidiennement des produits laitiers

	tous les jours. Choisir les produits laitiers peu gras.	ou parfumés sont des aliments ultra-transformés à limiter.	sucrés et enrichis en vitamine D.	Choisir ceux qui contiennent peu de matières grasses. En cas de non-consommation, A remplacer par des aliments riches en vitamine D et en calcium.
Poisson	Une à deux portions par semaines.		Consommer du poisson deux à trois fois par semaine. Varier les espèces entre poissons gras et maigres. Préférer les produits de la mer labélisée pêche écologique.	Au moins deux fois par semaine.
Huile et matières grasses	Modérer les matières grasses et les produits gras. Choisir plutôt de la matière grasse et de l'huile végétale.	Avec modération	Choisir des huiles bonnes pour la santé, comme l'huile, les matières grasses ou margarines de colza.	Éviter les acides gras saturés, trans ou hydrogénés. Utiliser les huiles de colza. Modérer les huiles de maïs ou de tournesol. Manger moins de fast food et d'aliments transformés.
Aliments transformés		Limiter la consommation des aliments transformés. Éviter celles des aliments ultra-transformés.		
Conseil comportemental	Préférer les aliments cuisinés, cuit rapidement en utilisant peu d'eau et de matières grasses. Utiliser des aliments, si possible frais (pour éviter les emballages). Prendre du temps et du plaisir à cuisiner.	Manger régulièrement, et consciemment dans un environnement approprié et si possible avec d'autres. Développer des compétences en cuisine. Prendre le temps pour que les aliments et l'action de manger. Rester prudent devant les messages publicitaires ou de marketing.	Essayer de maintenir une balance énergétique équilibrée en mangeant sans excès.	Construire des habitudes saines dans votre ménage en : Mangeant à horaire régulier Manger au moins un repas par jour ensemble. Rester un modèle pour vos enfants par rapport à l'alimentation et l'activité physique.

Peu après cette publication, le Haut Conseil de la Santé Publique (HCSP) a publié un avis relatif à la révision des repères alimentaires français pour les adultes du futur Programme National Nutrition Santé. Cet avis s'appuie sur des rapports de l'ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail), des auditions d'experts, les résultats de Santé publique France sur la compréhension, la connaissance et l'acceptabilité des repères alimentaires et

les repères de consommation dans d'autres pays. Dans ces nouveaux repères français, des éléments relatifs à la durabilité des régimes alimentaires ont été ajoutés (261). Il est par exemple conseillé de privilégier pour certains groupes d'aliments, ceux dont le mode de production diminue l'exposition aux pesticides (par principe de précaution), de limiter sa consommation de viande rouge à moins de 500g par semaine, alors qu'il faudrait éviter de dépasser deux portions de poissons, dont pas plus d'une de poissons gras. Ces nouvelles recommandations promeuvent également les légumineuses.

Des institutions non gouvernementales ont également proposé des principes pour promouvoir une alimentation plus durable. Six principes pour une « planète en bonne santé » ont été communiqués lors de la campagne Livewell du WWF (World Wide Fund). Ces principes sont : privilégier les aliments d'origine végétale, gaspiller moins de nourriture, manger moins de viande, manger moins d'aliments transformés (riche en sel, matières grasses et sucres), manger des aliments avec un écolabel et manger varié. L'association Solagro est quant à elle partie des transformations des systèmes alimentaires français nécessaires pour répondre à des enjeux environnementaux et sociaux afin de proposer une nouvelle structure de régimes, présentée sous forme d'assiette.

La définition de la FAO sur laquelle repose la thèse s'inscrit dans le cadre d'un développement durable faible, car les composantes environnementales de la définition n'ont pas plus d'importances que les autres. Pourtant, dans la pratique et au niveau individuel, il est difficile de ne pas hiérarchiser les composantes en fonction de nos valeurs ou convictions. Certaines personnes sont plus sensibles aux aspects relatifs à l'environnement alors que d'autres veilleront préférentiellement à ce que les droits humains soient respectés. Dans nos travaux (analyse exploratoire et construction de l'indice), nous avons volontairement tenté de ne pas hiérarchiser les composantes, pour rester le plus proche possible de la définition de la FAO. Il faut néanmoins souligner que le manque de données reste une limite qui impose une hiérarchisation involontaire des composantes de l'alimentation durable. Certains travaux précédemment cités nous ont permis de justifier nos choix et de valider le SDI à partir d'éléments externes, montrant qu'avec des approches différentes, la plupart des tendances sur l'évolution de la structure des régimes est retrouvée. Les quelques éléments non cohérents avec la littérature, concernent notamment la consommation de poisson. Ceci peut se justifier par les choix méthodologiques des études de références.

Une bonne cohérence entre nos résultats et les comportements alimentaires proposés comme plus durables par d'autres approches apporte de la robustesse à nos résultats. En effet, comme souligné dans l'introduction, la définition d'un régime alimentaire durable comporte des éléments flous et subjectifs comme l'acceptabilité culturelle. Aussi, comparativement aux travaux en épidémiologie sur

la durabilité des régimes alimentaires, nous avons utilisé beaucoup d'indicateurs, ce qui nous a permis de rendre l'identification plus holistique (136). Il était donc important de nous assurer que notre approche et l'ajout de nouveaux indicateurs n'étaient pas en complet désaccord avec les travaux précédents.

D'autres études sur les comportements avaient pour objectif la création d'échelles pour évaluer les pratiques en termes d'alimentation durable (262). Les résultats de ces travaux nous informent par exemple du fait que l'achat de produits locaux et la vigilance sur la quantité d'emballages sont des comportements plutôt populaires auprès de la population alors que la réduction de la consommation de viandes l'est moins (262,263). Ces résultats varient probablement selon les populations constituant l'échantillon. Il était intéressant pour nous de travailler sur des données observées pour l'identification des comportements alimentaires plus durables, car ces données peuvent s'interpréter comme des comportements réels donc atteignables pour certaines personnes.

b/ Généralisation des résultats?

Ce travail de thèse s'appuie sur un échantillon de volontaires présentant des caractéristiques sociodémographiques marquées par une grande proportion de femmes, de personnes ayant fait des études supérieures, et de catégories socioprofessionnelles plutôt favorisées (211). Ces travaux sont donc sujets aux biais de sélection. L'engagement dans la cohorte NutriNet-Santé peut aussi dans de nombreux cas être un marqueur d'un intérêt pour la nutrition ou la santé. De plus, nous pouvons soupçonner que certaines personnes ayant répondu aux questionnaires envoyés dans le cadre du projet BioNutriNet portent aussi un intérêt pour les questions relatives aux enjeux agricoles. Il a été noté que par rapport à l'ensemble de la cohorte, les personnes ayant répondu aux questionnaires de fréquence de consommation des aliments biologiques étaient aussi plus souvent des hommes (26% vs 21%) et des retraités (36% vs 14%) (101).

La généralisation de nos résultats nécessite de la prudence, étant donnée la non-représentativité de l'échantillon d'étude et certainement l'absence ou la sous-représentation de certains comportements. En effet, sur un échantillon représentatif de la population française de 4100 individus âgés de 15 à 74 ans, un travail de typologie a permis de distinguer 8 groupes de comportements alimentaires durables (264). Ce travail met en avant une augmentation globale de l'engagement des Français pour une alimentation durable, mais il montre que les raisons d'engagement et leurs mises en œuvre sont de plus en plus opposées entre ces groupes. Les différences sociodémographiques déterminent en partie l'appartenance aux différents groupes de la typologie (264). On peut faire l'hypothèse que notre échantillon contient peu de « changez rien » :

groupe qui ne souhaite pas intégrer les enjeux du développement durable, perçus comme une contrainte ou une mode, alors que les « exemplaires » qui ont une vision globale du développement durable sont certainement plus nombreux.

De plus, nous ne pouvons pas écarter l'existence dans les réponses aux questionnaires des biais de désirabilité. Ces biais peuvent amener les participants à répondre selon ce qu'ils considèrent être socialement une bonne réponse. L'usage de questionnaire par internet et le processus d'anonymisation permettent de réduire ces biais (265). Néanmoins, il demeure probable qu'il existe un décalage entre les comportements et les déclarations. Les biais de mémoire, relatifs aux erreurs et oublis dans les déclarations, ont pu provoquer également des disparités entre nos données et la réalité.

c/ Interprétation des associations avec la santé

Les analyses sur les associations entre le score d'évaluation de la durabilité, le SDI et la santé (l'obésité, le surpoids, la prise de masse, les cancers, les maladies cardiovasculaires et les deux ensembles) reposent sur une approche observationnelle sujette aux biais de confusion. Même si les ajustements sur un grand nombre de covariables nous ont permis d'écarter les principaux biais de confusion. Les associations observées sont dépendantes de l'échantillon, et des analyses similaires devront être effectuées dans d'autres cohortes afin que des méta-analyses puissent confirmer ou infirmer nos résultats de manière plus robuste. De plus, l'approche observationnelle ne nous permet pas d'affirmer l'existence de liens de cause à effet même si des hypothèses pour expliquer nos résultats semblent probables.

Réduire les émissions de gaz à effet de serre de la production de son régime n'explique probablement pas directement la protection observée vis-à-vis de la survenue de certains événements de santé. Néanmoins, le niveau de durabilité du régime, compromis entre les indicateurs de la durabilité inclus dans le SDI, est associé négativement aux événements de santé. Ainsi les régimes les plus durables, caractérisés par des structures particulières des régimes et une contribution non négligeable des aliments issus de l'agriculture biologique au régime apparaissent déterminants pour la santé.

Il apparaît important de prendre en compte et de valoriser le compromis des différentes dimensions de l'alimentation durable plutôt que de mettre l'accent sur uniquement un ou quelques éléments. D'ailleurs, les fortes corrélations entre la plupart des indicateurs et l'indice global semblent refléter le

fait que des volontaires de la cohorte agissent déjà sur plusieurs éléments de l'alimentation durable à la fois.

d/ Usage de l'optimisation comme outil d'aide à la décision

Le travail d'optimisation réalisé dans cette thèse a permis de dégager cinq solutions plus ou moins conservatrices par rapport aux habitudes actuelles. L'approche individuelle qui a été retenue permettait de prendre en compte les différences de comportements alimentaires de départ. Néanmoins, l'interprétation des résultats et leur usage doivent être réalisés en considérant qu'il s'agit de solutions venant de la mise en œuvre d'un outil mathématique, laissant de côté de nombreuses considérations humaines. Ainsi, malgré le nom d'optimum que l'on donne volontiers à ces solutions, il est très important de pouvoir les remettre en question et de les tester en conditions réelles.

S'il fallait choisir entre les solutions des différents scénarios, il serait alors préférable que ce choix soit réalisé en prenant en compte l'ensemble des activités humaines qui ont des impacts sur l'environnement, ceci afin de définir la part des efforts à réaliser revenant à l'alimentation. Aussi, afin de garantir le « culturellement acceptable » de nos solutions, il semble important que le plus grand nombre de personnes puisse participer aux processus de décisions sur les choix de répartition.

e/ La question du bonheur

Avant ce travail de thèse, nous nous étions demandé si les personnes dont le régime contenait une large part d'aliments biologiques étaient plus heureuses (266). Plus particulièrement, nous nous étions basés sur la décomposition du bonheur de Diener, en trois composantes : la présence d'émotions positives, l'absence d'émotion négative et la satisfaction avec sa vie (267). Les deux premières composantes évaluent les aspects émotionnels et fluctuants dans le temps alors que la troisième composante peut se définir comme une évaluation globale de la qualité de vie d'une personne selon les critères qu'elle a choisis (267). Dans le travail sur les consommateurs d'aliments biologiques, nous avons travaillé uniquement sur la troisième composante, plus stable dans le temps. Nos résultats montrent une association positive entre la consommation d'aliments biologiques et la satisfaction avec la vie (266). Nous avons expliqué cette association par des motivations hédonistes (ressentir du plaisir) et eudémoniques (penser faire ce qui est bien) de la consommation biologique. Dans le cadre de cette thèse, nous n'avons pas pu explorer s'il y avait également des associations entre l'adoption de comportements alimentaires durables, évaluée avec le SDI, et la satisfaction avec la vie des participants de notre échantillon. Ce travail pourrait participer à l'explication des

associations avec la santé ; être heureux contribuant à une meilleure santé (268–272) et à l'identification des leviers pour favoriser l'adoption de ces régimes.

3) Perspectives pour la suite des recherches

a/ Enrichissement des résultats avec de nouvelles données

Prise en compte des aspects toxicologiques

Dans le cadre du projet BioNutriNet, et à partir des données de la base du CVUA (Chemesches and Veterinarunter-suchungsamt) de Stuttgart, une table avec les teneurs en contaminants (résidus de 54 pesticides) des items d'origine végétale a pu être construite (144). Cette table servira pour les prochains travaux d'évaluation des expositions alimentaires à plusieurs pesticides et notamment ceux classés comme cancérogènes probables pour l'homme. À partir de cette table, un premier travail a montré une diminution importante de l'exposition à 13 pesticides (sur 15 testés) pour les personnes adoptant un régime avec une forte contribution des aliments issus de l'agriculture biologique (144). Uniquement l'exposition à 2 pesticides (Pyréthrines et Spinosad) était plus forte dans ces régimes, car autorisés en agriculture biologique.

Des travaux ont montré que selon la structure des régimes, les individus ne sont pas exposés aux mêmes substances (273). De plus, certaines de ces substances peuvent avoir des effets combinés, même à petites doses, différents des effets liés aux molécules individuelles. L'objectif d'un travail de thèse qui a commencé l'année dernière consiste à identifier dans l'échantillon des personnes ayant répondu au FFQ-Bio, des profils d'apports en résidus de pesticides d'origine alimentaires et d'évaluer les associations entre ces profils ainsi que le risque de survenue de plusieurs maladies chroniques.

Prendre en compte les aspects toxicologiques dans la considération de la durabilité des régimes alimentaires permettra de répondre à de nombreuses questions de recherches en santé publique et en environnement, non considérées dans cette thèse. Une comparaison entre les profils d'exposition en résidus de pesticides et les profils plus durables identifiés dans le cadre de ce travail serait effectivement d'un intérêt majeur.

Affiner l'évaluation de l'impact environnemental des régimes

L'évaluation de l'impact environnemental des régimes pourrait être enrichie par des indicateurs supplémentaires dont certains sont ou pourraient être mesurés au sein de l'échantillon des fermes ayant eu recours à l'outil DIALECTE. La demande en eau, le cycle de l'azote ou l'indice de traitement

des cultures sont des indicateurs particulièrement pertinents pour approfondir ce travail. Le traitement de ces données fait actuellement l'objet de réflexion.

Travailler à l'élargissement du périmètre de cycle de vie, pour tenir compte des transports et des procédés de transformation permettrait également d'affiner nos résultats.

Réflexion autour d'indicateurs manquants

L'ajout de certaines questions dans les questionnaires et leur traitement pourrait nous permettre d'ajouter à la version actuelle du SDI et ainsi couvrir d'autres composantes de l'alimentation durable bien que celui-ci soit déjà précis. Notamment, nous pourrions considérer l'achat d'aliments de saison, les démarches entreprises pour réduire les déchets, ou l'achat d'aliments issus du commerce équitable.

Il serait également particulièrement pertinent et novateur de considérer l'environnement géographique des participants. En effet, quelques travaux suggèrent que l'accessibilité géographique à des aliments frais, labélisés et locaux dépend des lieux d'habitation (89). Ainsi, compléter nos bases avec un indicateur d'évaluation de la proximité aux aliments recommandés serait particulièrement enrichissant dans la compréhension des freins à une alimentation durable.

b/ Validation des associations

Les résultats concernant les associations entre comportements alimentaires plus durables observés au sein de la cohorte NutriNet-Santé et les événements de santé devront être validés, à la fois dans d'autres cohortes, mais également au sein de la cohorte NutriNet-Santé sur un temps plus long. En effet, le temps de suivi était court et sur cette période, nous avons observé un nombre relativement faible de cas limitant la puissance statistique. L'étude sur un temps plus important et la prise en compte de la durée des régimes nous permettrait de définir les associations plus précisément et de distinguer les différentes maladies chroniques (plus de cas).

Mener des études similaires sur d'autres cohortes pourrait apporter d'autres résultats nécessaires à la réalisation ultérieure de méta-analyses. Ces méta-analyses confirmeront ou infirmeront de manières plus robustes nos premières observations. Il serait peut-être utile, d'envisager la création d'un SDI simplifié, nécessitant moins de données afin d'être plus facilement reproductible.

c/ Optimisation : de nombreux travaux à entreprendre

Les solutions de régime obtenues dans les 5 scénarios pourraient faire l'objet de tests afin de vérifier leur applicabilité et leur acceptabilité. Pour cela, et en nous inspirant du travail d'autres chercheurs,

nous pourrions solliciter des diététiciens afin de construire des menus basés sur les solutions obtenues. Ces menus pourraient être proposés à des volontaires afin d'évaluer l'acceptabilité et leur satisfaction avec les menus proposés. Cette seconde phase apporterait des éléments nous assurant du réalisme en termes de mise en œuvre ou non des solutions. Les solutions pourront aussi être intégrées dans une modélisation de type PRIME (274), pour estimer le nombre de décès prématurés évités, si les régimes optimisés étaient adoptés par la population. Si les résultats montrent un grand nombre de décès évités et une acceptabilité des populations, ce travail apportera des arguments supplémentaires pour inciter la mise en œuvre de mesures de promotion de ces régimes.

La méthode développée dans le cadre de cette thèse sera aussi utilisée dans d'autres travaux en intégrant par exemple des contraintes toxicologiques dans la recherche de solutions. Il sera alors nécessaire de revoir la structure du problème afin d'identifier des solutions. De manière à faciliter le travail, il serait intéressant d'envisager l'usage d'un logiciel d'optimisation plus performant sur de grands échantillons. Le logiciel SAS® gère difficilement la répétition de la procédure proc optmodel®, rendant la réalisation de nombreuses optimisations nécessaire à l'analyse au niveau individuel compliquée.

d/ Mieux considérer les possibilités et freins aux changements

En 2018, il a été demandé aux Nutrinautes de compléter le même questionnaire d'évaluation de la consommation alimentaire, le FFQ-bio. Ces nouvelles données recueillies permettront en particulier d'évaluer les changements en termes d'alimentation, effectués au cours des quatre dernières années.

Il est prévu dans le cadre d'un nouveau projet de recherche sur l'étude des transitions vers des régimes plus durables que les évolutions des comportements alimentaires repérées soient comparées avec celles qui seraient proposées par l'usage de l'optimisation. Ces analyses permettront de repérer les potentielles évolutions nécessaires pour améliorer la durabilité des régimes alimentaires selon l'outil d'optimisation et de les étudier au regard des évolutions observées dans l'échantillon entre 2014 et 2019. Le repérage des évolutions proposées par l'outil d'optimisation, mais qui ne sont pas appliquées par les volontaires de l'étude, permettrait en particulier d'orienter les recherches sur les freins aux changements des individus de notre étude.

e/ Diffusion des travaux de recherche

L'étude de la durabilité des régimes alimentaires est récente en épidémiologie nutritionnelle. La définition stabilisée de l'alimentation durable de la FAO ne date que de 2010. Les premiers travaux

sur l'évaluation des impacts environnementaux de l'alimentation sont un peu plus anciens, mais cette thèse s'inscrit tout de même dans un domaine de recherche nouveau.

De plus, l'étude de l'alimentation est complexe tant il est possible de la relier à de multiples dimensions. L'étude de la durabilité des régimes alimentaires par son caractère multidisciplinaire et sa vocation à répondre à de nombreux enjeux l'est d'autant plus. Pourtant, les attentes sont extrêmement fortes. Lors de cette thèse, j'ai pu être témoin d'un intérêt très important pour les résultats obtenus et plus généralement pour les questions d'alimentation. Ainsi, un défi qui attend le monde de la recherche sera de transmettre ces nouvelles connaissances auprès du grand public, de manière scientifique et éthique, mais suffisamment vulgarisées pour être comprise et si possible appliquée.

Face aux enjeux auxquels souhaite répondre l'alimentation durable, une appropriation par toutes et tous, des questions d'accès et des conditions de production, de transformation et de distribution, apparaît primordiale.

Conclusion générale

Les défis planétaires à l'origine des travaux sur l'alimentation durable mettent en avant la nécessité de changer les systèmes alimentaires. Dans ce contexte, nous avons relié la production à la consommation en tentant d'identifier les meilleurs compromis et des optimaux de régimes alimentaires sur plusieurs dimensions de la durabilité des régimes.

Nos travaux proposent des régimes de bonne qualité nutritionnelle et parvenant à répondre en partie aux urgences environnementales tout en tentant de veiller à leur accessibilité économique et leur acceptabilité. L'étude des associations avec la santé semble montrer, même si cela reste à confirmer, un rôle protecteur de ces régimes, vis-à-vis des cancers, et de l'obésité.

Ces solutions étant identifiées au sein de notre échantillon d'étude, de multiples questions sur le changement se posent : A quel point les efforts doivent-ils être portés sur les régimes alimentaires par rapport à d'autres activités ? Les modifications des régimes alimentaires doivent-elles avoir une portée universelle ou au contraire doit-t-on s'adapter à chacun ? Comment impulser des changements de l'intérieur ?

Dans un contexte d'après-guerre, Albert Camus nous alertait sur la nécessité, mais aussi l'immensité de la tâche visant à éviter que le monde se défasse. Il est facile d'imaginer qu'il faisait en particulier référence aux guerres et événements malheureux de l'histoire du début du 20^{ème} siècle. Dans le contexte actuel, cette citation me semble encore plus vraie. On peut, en effet aisément y ajouter les dangers relatifs à la destruction de l'environnement. L'enjeu ne sera donc pas de refaire le monde à notre image, mais de continuer à l'étudier, le comprendre pour proposer des changements avant qu'il ne soit trop tard.

Références

1. Malassis L. Economie agro-alimentaire. T. I. Economie de la consommation et de la production agro-alimentaire. Rev Économique. 1981;32(3):597-8.
2. Touzard J-M, Fournier S. Des systèmes alimentaires articulés et transversaux pour une sécurité alimentaire. Vertigo Rev Électronique En Sci Environ. mai 2014;14(1).
3. Claquin P, Martin A, Deram C, Bidaud F, Delgoulet E, Gassie J, et al. MOND'Alim 2030 Panorama prospectif de la mondialisation des systèmes alimentaires. La documentation française. Paris;
4. IPCC. Global warming of 1,5°C [Internet]. 2018. Disponible sur: www.ipcc.ch
5. Garnett T. Where are the best opportunities for reducing greenhouse gas emissions in the food system (including the food chain)? Food Policy. janv 2011;36:S23-32.
6. Bryngelsson D, Hedenus F, Johansson D, Azar C, Wirsenius S. How Do Dietary Choices Influence the Energy-System Cost of Stabilizing the Climate? Energies. 5 févr 2017;10(2):182.
7. Bryngelsson D, Wirsenius S, Hedenus F, Sonesson U. How can the EU climate targets be met? A combined analysis of technological and demand-side changes in food and agriculture. Food Policy. févr 2016;59:152-64.
8. Camanzi L, Alikadic A, Compagnoni L, Merloni E. The impact of greenhouse gas emissions in the EU food chain: A quantitative and economic assessment using an environmentally extended input-output approach. J Clean Prod. juill 2017;157:168-76.
9. Garnett T. What is a sustainable healthy diet? A discussion paper. Food Climate Research Network; 2014 avr.
10. Akbi A. Les implications du développement des biocarburants [Internet]. [Nice]: Nice Sophia Antipolis; 2013. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00936588/document>
11. Brown O. Migrations et changements climatiques. OIM Organisation internationale pour les migrations; 2008.
12. FAO Food and Agriculture Organizations of the United Nations. FAO Strategy on climate change [Internet]. 2017. Disponible sur: <http://www.fao.org/3/a-i7175e.pdf>
13. Koubi V. Climate Change and Conflict. Annu Rev Polit Sci [Internet]. 13 mai 2019 [cité 29 mars 2019];22(1). Disponible sur: <https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-polisci-050317-070830>
14. Springmann M, Mason-D'Croz D, Robinson S, Garnett T, Godfray HCJ, Gollin D, et al. Global and regional health effects of future food production under climate change: a modelling study. The Lancet. mai 2016;387(10031):1937-46.
15. Altieri MA, Nicholls CI, Henao A, Lana MA. Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. Agron Sustain Dev. juill 2015;35(3):869-90.
16. He Z, Shentu J, Yang X, Baligar V, Zhang T, Stoffella P. Heavy Metal Contamination of Soils: sources, Indicators and Assessment. J Environ Indic. 2015;(9):17-8.

17. Key world energy statistics [Internet]. IEA International Energy Agency; 2014. Disponible sur: <https://www.fossilfuelsreview.ed.ac.uk/resources/Evidence%20-%20Climate%20Science/IEA%20-%20Key%20World%20Energy%20Statistics.pdf>
18. Aquastat. Prélèvement d'eau [Internet]. FAO; 2014. Disponible sur: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/indexfra.stm>
19. Agence de l'Eau Seine-Normandie | Agence de l'Eau Seine-Normandie [Internet]. [cité 3 avr 2019]. Disponible sur: <http://www.eau-seine-normandie.fr/index.php?id=2569>
20. Aquastat. Stress hydrique [Internet]. FAO; 2014. Disponible sur: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/infographics/Stress_fra.pdf
21. Nesme T, Doré T, Leenhardt D, Pellerin S. Agriculture et ressources naturelles: de quoi parlons-nous? *Agron Environ Sociétés*. 2016;6(1):13-23.
22. Tissot B. Quel avenir pour les combustibles fossiles ? Les avancées scientifiques et technologiques permettront-elles la poursuite d'un développement soutenable avec les énergies carbonées ? *Comptes Rendus Académie Sci - Ser IIA - Earth Planet Sci*. 31 déc 2001;333(12):787-96.
23. McGlade C, Ekins P. The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2 °C. *Nature*. janv 2015;517(7533):187-90.
24. Cardinale BJ, Duffy JE, Gonzalez A, Hooper DU, Perrings C, Venail P, et al. Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*. juin 2012;486(7401):59-67.
25. IPBES. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. 2019 mai.
26. Ceballos G, Ehrlich PR, Barnosky AD, García A, Pringle RM, Palmer TM. Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Sci Adv*. juin 2015;1(5):e1400253.
27. Le printemps 2018 s'annonce silencieux dans les campagnes françaises | Muséum national d'Histoire naturelle [Internet]. [cité 27 mars 2019]. Disponible sur: <https://www.mnhn.fr/fr/recherche-expertise/actualites/printemps-2018-s-annonce-silencieux-campagnes-francaises>
28. Sánchez-Bayo F, Wyckhuys KAG. Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biol Conserv*. avr 2019;232:8-27.
29. Tsiafouli MA, Thébault E, Sgardelis SP, de Ruiter PC, van der Putten WH, Birkhofer K, et al. Intensive agriculture reduces soil biodiversity across Europe. *Glob Change Biol*. févr 2015;21(2):973-85.
30. Lanz B, Dietz S, Swanson T. The Expansion of Modern Agriculture and Global Biodiversity Decline: An Integrated Assessment. *Ecol Econ*. févr 2018;144:260-77.
31. Weinzettel J, Vačkář D, Medková H. Human footprint in biodiversity hotspots. *Front Ecol Environ*. oct 2018;16(8):447-52.

32. Fumey G, Raffard P. Atlas de l'alimentation. CNRS Editions. Paris; 2018.
33. Soler L-G, Réquillart V, Gilles T. Chapitre 5 Organisation industrielle et durabilité. In: duALIne durabilité de l'alimentation face à de nouveaux enjeux Questions à la recherche. Quae. Paris: inra et cirad; 2011. p. 86-96.
34. Monteiro CA, Cannon G, Moubarac J-C, Jaime P, Martins APB, Canella D, et al. NOVA. The star shines bright Food classification. *Public health*. 2016 mars p. 28-38.
35. Moubarac J-C, Martins APB, Claro RM, Levy RB, Cannon G, Monteiro CA. Consumption of ultra-processed foods and likely impact on human health. Evidence from Canada. *Public Health Nutr*. déc 2013;16(12):2240-8.
36. Poti JM, Mendez MA, Ng SW, Popkin BM. Is the degree of food processing and convenience linked with the nutritional quality of foods purchased by US households? *Am J Clin Nutr*. 1 juin 2015;101(6):1251-62.
37. Adams J, White M. Characterisation of UK diets according to degree of food processing and associations with socio-demographics and obesity: cross-sectional analysis of UK National Diet and Nutrition Survey (2008–12). *Int J Behav Nutr Phys Act*. déc 2015;12(1):160.
38. Martínez Steele E, Popkin BM, Swinburn B, Monteiro CA. The share of ultra-processed foods and the overall nutritional quality of diets in the US: evidence from a nationally representative cross-sectional study. *Popul Health Metr*. déc 2017;15(1):6.
39. INSERM. Inégalités sociales de santé en lien avec l'alimentation et l'activité physique. Paris: Inserm; 2014.
40. Popkin BM. Part II. What is unique about the experience in lower-and middle-income less-industrialised countries compared with the very-highincome industrialised countries? *Public Health Nutr* [Internet]. févr 2002 [cité 9 avr 2019];5(1a). Disponible sur: http://www.journals.cambridge.org/abstract_S1368980002000290
41. Tabrez S, Priyadarshini M, Priyamvada S, Khan MS, Na A, Zaidi SK. Gene–environment interactions in heavy metal and pesticide carcinogenesis. *Mutat Res Toxicol Environ Mutagen*. janv 2014;760:1-9.
42. Nougadère A, Sirot V, Kadar A, Fastier A, Truchot E, Vergnet C, et al. Total diet study on pesticide residues in France: Levels in food as consumed and chronic dietary risk to consumers. *Environ Int*. sept 2012;45:135-50.
43. European Food Safety Authority. The 2016 European Union report on pesticide residues in food. *EFSA J* [Internet]. juill 2018 [cité 18 avr 2019];16(7). Disponible sur: <http://doi.wiley.com/10.2903/j.efsa.2018.5348>
44. Lavarde P, Lesteven P, Moquay V, Vedeau F. La stratégie nationale sur les perturbateurs endocriniens (SNPE) Evaluation de la mise en oeuvre et propositions d'évolution [Internet]. Paris: CGEDD, IGAS et CGAER; 2017 déc p. 144. Disponible sur: <http://www.igas.gouv.fr/IMG/pdf/2017-117R.pdf>
45. Schäffer A, Filser J, Frische T, Gessner MO, Köck W, Kratz W, et al. Der stumme Frühling: zur Notwendigkeit eines umweltverträglichen Pflanzenschutzes. Halle (Saale): Deutsche Akademie

- der Naturforscher Leopoldina e.V. - Nationale Akademie der Wissenschaften; 2018. 65 p. (Diskussion / Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina).
46. Esnouf C, Bricas N, Russel M. Chapitre 1 De nouveaux enjeux pour les systèmes alimentaires. In: DuALine durabilité de l'alimentation face à de nouveaux enjeux Questions à la recherche. Quae. inra et cirad; 2011. p. 9-25.
 47. Masson E. Représentations de l'alimentation : crise de la confiance et crises alimentaires. Bull Psychol. 2011;Numéro 514(4):307.
 48. Cardon P, Depecker T, Plessz M. Sociologie de l'alimentation. Malakoff: Armand Colin; 2019. 222 p. (Collection U).
 49. Comité de la sécurité alimentaire mondiale 2012. s'entendre sur la terminologie: Sécurité alimentaire; Sécurité nutritionnelle; Sécurité alimentaire et nutrition; Sécurité alimentaire et nutritionnelle. Rome; 2012 nov. Report No.: 39ème session.
 50. FAO, FIDA, OMS, PAM, UNICEF. L'État de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde 2018. Renforcer la résilience face aux changements climatiques pour la sécurité alimentaire et la nutrition. 2018.
 51. Tschardt T, Clough Y, Wanger TC, Jackson L, Motzke I, Perfecto I, et al. Global food security, biodiversity conservation and the future of agricultural intensification. Biol Conserv. juill 2012;151(1):53-9.
 52. De Schutter O. How not to think of land-grabbing: three critiques of large-scale investments in farmland. J Peasant Stud. mars 2011;38(2):249-79.
 53. Murphy M, Dowding timothy. The Coffee Bean:A Value Chain and Sustainability Initiatives Analysis. University of Connecticut; 2014.
 54. CNUCED. Rapport sur le commerce et le développement [Internet]. New York et Genève; 2009. Disponible sur: https://unctad.org/fr/Docs/tdr2009overview_fr.pdf
 55. De Schutter O. La spéculation sur les denrées alimentaires et les crises des prix alimentaires une réglementation pour réduire les risques d'instabilité des cours [Internet]. 2010. Disponible sur: https://www.ohchr.org/Documents/Issues/Food/BN2_SRRTF_Speculation_FRENCH.pdf
 56. ANSES. Etude individuelle nationale des consommations alimentaires 3 (inca3) Avis de l'Anses Rapport d'expertise collective. 2017.
 57. Bazin A, Bocquet E. Rapport d'information fait au nom de la commission des finances sur le financement de l'aide alimentaire [Internet]. Paris: Sénat; 2018 oct. Report No.: 34. Disponible sur: <http://www.senat.fr/rap/r18-034/r18-0341.pdf>
 58. Paturel D, Ramel M. Ethique du care et démocratie alimentaire: les enjeux du droit à une alimentation durable. ERES. 2017;(4):49-60.
 59. Bailey RL, West Jr. KP, Black RE. The Epidemiology of Global Micronutrient Deficiencies. Ann Nutr Metab. 2015;66(2):22-33.

60. Willett W, Rockström J, Loken B, Springmann M, Lang T, Vermeulen S, et al. Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet* [Internet]. janv 2019 [cité 22 janv 2019]; Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140673618317884>
61. Chooi YC, Ding C, Magkos F. The epidemiology of obesity. *Metabolism*. mars 2019;92:6-10.
62. Verdot C, Torres M, Salanave B, Deschamps V. Corpulence des enfants et des adultes en France métropolitaine en 2015. Résultats de l'étude Esteban et évolution depuis 2006. *Bull Epidemiol Hebd*. 19 mai 2017;234-41.
63. Popkin BM, Adair LS, Ng SW. Global nutrition transition and the pandemic of obesity in developing countries. *Nutr Rev*. janv 2012;70(1):3-21.
64. Kesse-Guyot E, Baudry J, Assmann KE, Galan P, Hercberg S, Lairon D. Prospective association between consumption frequency of organic food and body weight change, risk of overweight or obesity: results from the NutriNet-Santé Study. *Br J Nutr*. janv 2017;117(02):325-34.
65. Forouzanfar MH, Afshin A, Alexander LT, Anderson HR, Bhutta ZA, Biryukov S, et al. Global, regional, and national comparative risk assessment of 79 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks, 1990–2015: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2015. *The Lancet*. oct 2016;388(10053):1659-724.
66. Singh GM, Danaei G, Farzadfar F, Stevens GA, Woodward M, Wormser D, et al. The Age-Specific Quantitative Effects of Metabolic Risk Factors on Cardiovascular Diseases and Diabetes: A Pooled Analysis. Wang G, éditeur. *PLoS ONE*. 30 juill 2013;8(7):e65174.
67. Czernichow S, Kengne A-P, Stamatakis E, Hamer M, Batty GD. Body mass index, waist circumference and waist-hip ratio: which is the better discriminator of cardiovascular disease mortality risk? Evidence from an individual-participant meta-analysis of 82 864 participants from nine cohort studies: Adiposity & mortality. *Obes Rev*. mai 2011;no-no.
68. Lauby-Secretan B, Scoccianti C, Loomis D, Grosse Y, Bianchini F, Straif K. Body Fatness and Cancer — Viewpoint of the IARC Working Group. *N Engl J Med*. 25 août 2016;375(8):794-8.
69. Anandacoomarasamy A, Caterson I, Sambrook P, Fransen M, March L. The impact of obesity on the musculoskeletal system. *Int J Obes*. févr 2008;32(2):211-22.
70. Anstey KJ, Cherbuin N, Budge M, Young J. Body mass index in midlife and late-life as a risk factor for dementia: a meta-analysis of prospective studies: BMI and risk of dementia. *Obes Rev*. mai 2011;12(5):e426-37.
71. Schulze MB, Martínez-González MA, Fung TT, Lichtenstein AH, Forouhi NG. Food based dietary patterns and chronic disease prevention. *BMJ*. 13 juin 2018;k2396.
72. Baudry J, Lelong H, Adriouch S, Julia C, Allès B, Hercberg S, et al. Association between organic food consumption and metabolic syndrome: cross-sectional results from the NutriNet-Santé study. *Eur J Nutr*. oct 2018;57(7):2477-88.
73. Baudry J, Assmann KE, Touvier M, Allès B, Seconda L, Latino-Martel P, et al. Association of Frequency of Organic Food Consumption With Cancer Risk: Findings From the NutriNet-Santé Prospective Cohort Study. *JAMA Intern Med*. 1 déc 2018;178(12):1597.

74. Bradbury KE, Balkwill A, Spencer EA, Roddam AW, Reeves GK, Green J, et al. Organic food consumption and the incidence of cancer in a large prospective study of women in the United Kingdom. *Br J Cancer*. 29 avr 2014;110(9):2321-6.
75. ADEME, Le Basic, AScA. Effets économiques et sociaux d'une alimentation plus durable: été des lieux. Volet 2 « analyse des valeurs socio-économiques de l'alimentation ». ADEME; 2017.
76. ADEME, Le Basic, AScA, Dufour A, Poux X. Effets économiques et sociaux d'une alimentation plus durable: état des lieux. Volet « Analyse des valeurs sociales de l'alimentation ». p. 46.
77. Delame N. Les revenus non agricoles réduisent les écarts de revenus entre foyers d'agriculteurs. *Insee Réf.* févr 2015;21-42.
78. BASIC. Café: la success story qui cache la crise Etude sur la durabilité de la filière du café. Max Havelaar France, Commerce Equitable France, Collectif «Repenser les filières», Basic; 2018.
79. Samper L, Quiñones-Ruiz X. Towards a Balanced Sustainability Vision for the Coffee Industry. *Resources*. 5 avr 2017;6(2):17.
80. Muller A, Sukhdev P. Mesurer ce qui compte vraiment dans les systèmes agro-alimentaires Une synthèse des résultats et des recommandations du rapport Fondements scientifiques et économiques de la TEEB pour l'agriculture et l'alimentation. *ONU environnement*; 2018.
81. Sandhu HS, Wratten SD, Cullen R, Case B. The future of farming: The value of ecosystem services in conventional and organic arable land. An experimental approach. *Ecol Econ*. févr 2008;64(4):835-48.
82. FAO Food and Agriculture Organizations of the United Nations. Natural Capital Impacts in Agriculture Supporting better business decision-making [Internet]. Rome; 2015. Disponible sur: <http://www.fao.org/nr/sustainability/natural-capital>
83. Gadrey J, Lalucq A. Faut-il donner un prix à la nature? Paris: Petits matins [u.a.]; 2015. 120 p. (Politiques de la transition).
84. Agreste. Exploitations et population agricoles. Ministère de l'agriculture et de l'alimentation; 2017.
85. La Banque mondiale. Perspectives d'urbanisation du monde, Nations Unies. [Internet]. [cité 12 juin 2019]. Disponible sur: <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/sp.urb.totl.in.zs>
86. Calicioglu O, Flammini A, Bracco S, Bellù L, Sims R. The Future Challenges of Food and Agriculture: An Integrated Analysis of Trends and Solutions. *Sustainability*. 4 janv 2019;11(1):222.
87. La Via Campesina. Les luttes de la Via Campesina pour la réforme agraire la défense de la vie, de la terre et des territoires [Internet]. 2017. Disponible sur: <https://viacampesina.org/fr/wp-content/uploads/sites/4/2017/10/Publication-of-Agrarian-Reform-FR.compressed.pdf>
88. Walker RE, Keane CR, Burke JG. Disparities and access to healthy food in the United States: A review of food deserts literature. *Health Place*. sept 2010;16(5):876-84.

89. Fleury P. Justice alimentaire et bio [Internet]. INRA Département Sciences pour l'Action et le Développement de l'INRA; 2018. (Les webinaires de la priorité « systèmes alimentaires urbains »). Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=FMncThAjp3I&t=1s>
90. Ramel M, Boissonnat Pelsy H, Sibué-De Caigny C, Zimmer M-F. Se nourrir lrsqu'on est pauvre Analyse et ressenti de personnes en situation de précarité. mars 2014;25.
91. Boltanski L, Chiapello E. Le nouvel esprit du capitalisme. Gallimard. 2011.
92. Vivien F-D. Jalons pour une histoire de la notion de développement durable. Mondes En Dév. 2003;121(1):1.
93. Fressoz J-B, Graber F, Locher F, Quenet G. Introduction à l'histoire environnementale. La Découverte. Paris; 2014. (Repères).
94. Lang T, Barling D. Food security and food sustainability: reformulating the debate: Food security and food sustainability: reformulating the debate. Geogr J. déc 2012;178(4):313-26.
95. Zurek M, Hebinck A, Leip A, Vervoort J, Kuiper M, Garrone M, et al. Assessing Sustainable Food and Nutrition Security of the EU Food System—An Integrated Approach. Sustainability. 19 nov 2018;10(11):4271.
96. FAO. sustainable diets and biodiversity [Internet]. Nutrition and Consumer Protection Division; Disponible sur: <http://www.fao.org/docrep/016/i3004e/i3004e.pdf>
97. Fischer C, Garnett T. Plates, pyramides and planets Developments in national healthy and sustainable dietary guidelines: a state of plays assessment. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Food climate Research Network; 2016.
98. Déclaration de Nyéléni. 2007.
99. SUSFANS. Exploring the European Food System [Internet]. 2015 [cité 12 juin 2019]. Disponible sur: <https://www.susfans.eu/>
100. Ziegler J. Le droit à l'alimentation. Essai Mille et une nuits. 2003. 236 p. (Sciences humaines).
101. Baudry J. Consommation de produits issus de l'agriculture biologique dans l'étude NutriNet-Santé. [Bobigny]: Paris 13; 2016.
102. Mathieu S, Dorard G. Végétarisme, végétalisme, véganisme : aspects motivationnels et psychologiques associés à l'alimentation sélective. Presse Médicale. sept 2016;45(9):726-33.
103. Le Mouël C, Forslund A. How can we feed the world in 2050? A review of the responses from global scenario studies. Eur Rev Agric Econ. sept 2017;44(4):541-91.
104. Springmann M, Clark M, Mason-D'Croz D, Wiebe K, Bodirsky BL, Lassaletta L, et al. Options for keeping the food system within environmental limits. Nature. oct 2018;562(7728):519-25.
105. Couturier C, Charru M, Doublet S, Pointereau P. Afterres2050 [Internet]. Association Solagro; 2016 [cité 3 oct 2017]. Disponible sur: http://afterres2050.solagro.org/wp-content/uploads/2015/11/Solagro_afterres2050-v2-web.pdf

106. Reganold JP, Wachter JM. Organic agriculture in the twenty-first century. *Nat Plants*. 3 févr 2016;2(2):15221.
107. Muller A, Schader C, El-Hage Scialabba N, Brüggemann J, Isensee A, Erb K-H, et al. Strategies for feeding the world more sustainably with organic agriculture. *Nat Commun* [Internet]. déc 2017 [cité 24 nov 2017];8(1). Disponible sur: <http://www.nature.com/articles/s41467-017-01410-w>
108. Eyhorn F, Muller A, Reganold JP, Frison E, Herren HR, Luttikholt L, et al. Sustainability in global agriculture driven by organic farming. *Nat Sustain*. avr 2019;2(4):253-5.
109. Gustafson D, Gutman A, Leet W, Drewnowski A, Fanzo J, Ingram J. Seven Food System Metrics of Sustainable Nutrition Security. *Sustainability*. 23 févr 2016;8(3):196.
110. Gazan R, Brouzes CMC, Vieux F, Maillot M, Lluch A, Darmon N. Mathematical Optimization to Explore Tomorrow's Sustainable Diets: A Narrative Review. *Adv Nutr*. 1 sept 2018;9(5):602-16.
111. van Dooren C. A Review of the Use of Linear Programming to Optimize Diets, Nutritiously, Economically and Environmentally. *Front Nutr* [Internet]. 21 juin 2018 [cité 10 janv 2019];5. Disponible sur: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fnut.2018.00048/full>
112. Macdiarmid JI, Kyle J, Horgan GW, Loe J, Fyfe C, Johnstone A, et al. Sustainable diets for the future: can we contribute to reducing greenhouse gas emissions by eating a healthy diet? *Am J Clin Nutr*. 1 sept 2012;96(3):632-9.
113. Kramer GF, Tyszler M, Veer P van't, Blonk H. Decreasing the overall environmental impact of the Dutch diet: how to find healthy and sustainable diets with limited changes. *Public Health Nutr*. juin 2017;20(09):1699-709.
114. Donati M, Menozzi D, Zighetti C, Rosi A, Zinetti A, Scazzina F. Towards a sustainable diet combining economic, environmental and nutritional objectives. *Appetite*. nov 2016;106:48-57.
115. Barré T, Vieux F, Perignon M, Cravedi J-P, Amiot M-J, Micard V, et al. Reaching Nutritional Adequacy Does Not Necessarily Increase Exposure to Food Contaminants: Evidence from a Whole-Diet Modeling Approach. *J Nutr*. 1 oct 2016;146(10):2149-57.
116. ANSES Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail. Avis relatif à l'actualisation des repères du PNNS: révision des repères de consommations alimentaires [Internet]. 2016. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2012SA0103Ra-1.pdf>
117. Scarborough P, Appleby PN, Mizdrak A, Briggs ADM, Travis RC, Bradbury KE, et al. Dietary greenhouse gas emissions of meat-eaters, fish-eaters, vegetarians and vegans in the UK. *Clim Change*. juill 2014;125(2):179-92.
118. Tilman D, Clark M. Global diets link environmental sustainability and human health. *Nature*. 27 nov 2014;515(7528):518-22.
119. Martinez-Gonzalez MA, Sanchez-Tainta A, Corella D, Salas-Salvado J, Ros E, Aros F, et al. A provegetarian food pattern and reduction in total mortality in the Prevencion con Dieta Mediterranea (PREDIMED) study. *Am J Clin Nutr*. 1 juill 2014;100(Supplement_1):320S-328S.

120. Lacour C, Seconda L, Allès B, Hercberg S, Langevin B, Pointereau P, et al. Environmental Impacts of Plant-Based Diets: How Does Organic Food Consumption Contribute to Environmental Sustainability? *Front Nutr* [Internet]. 9 févr 2018 [cité 15 févr 2018];5. Disponible sur: <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fnut.2018.00008/full>
121. Verger EO, Mariotti F, Holmes BA, Paineau D, Huneau J-F. Evaluation of a Diet Quality Index Based on the Probability of Adequate Nutrient Intake (PANDiet) Using National French and US Dietary Surveys. *PLOS ONE*. 3 août 2012;7(8):e42155.
122. Biesbroek S, Bueno-de-Mesquita HB, Peeters PH, Verschuren WM, van der Schouw YT, Kramer GF, et al. Reducing our environmental footprint and improving our health: greenhouse gas emission and land use of usual diet and mortality in EPIC-NL: a prospective cohort study. *Environ Health* [Internet]. déc 2014 [cité 20 déc 2016];13(1). Disponible sur: <http://ehjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/1476-069X-13-27>
123. Lafay L, Volatier J-L, Bénétiér C, Bertin M, Calamassi-Tran G, Dubuisson C, et al. Etude individuelle Nationale des Consommations Alimentaires 2 (INCA 2) (2006-2007) [Internet]. Afssa Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments; 2009. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/system/files/PASER-Ra-INCA2.pdf>
124. Vieux F, Darmon N, Touazi D, Soler LG. Greenhouse gas emissions of self-selected individual diets in France: Changing the diet structure or consuming less? *Ecol Econ*. mars 2012;75:91-101.
125. de Gavelle E, Huneau J-F, Bianchi C, Verger E, Mariotti F. Protein Adequacy Is Primarily a Matter of Protein Quantity, Not Quality: Modeling an Increase in Plant:Animal Protein Ratio in French Adults. *Nutrients*. 8 déc 2017;9(12):1333.
126. Hallström E, Davis J, Woodhouse A, Sonesson U. Using dietary quality scores to assess sustainability of food products and human diets: A systematic review. *Ecol Indic*. oct 2018;93:219-30.
127. Monsivais P, Scarborough P, Lloyd T, Mizdrak A, Luben R, Mulligan AA, et al. Greater accordance with the Dietary Approaches to Stop Hypertension dietary pattern is associated with lower diet-related greenhouse gas production but higher dietary costs in the United Kingdom. *Am J Clin Nutr*. 7 janv 2015;102(1):138-45.
128. Dernini S, Berry E, Serra-Majem L, La Vecchia C, Capone R, Medina F, et al. Med Diet 4.0: the Mediterranean diet with four sustainable benefits. *Public Health Nutr*. mai 2017;20(7):1322-30.
129. Aleksandrowicz L, Green R, Joy EJM, Smith P, Haines A. The Impacts of Dietary Change on Greenhouse Gas Emissions, Land Use, Water Use, and Health: A Systematic Review. Wiley AS, éditeur. *PLOS ONE*. 3 nov 2016;11(11):e0165797.
130. Hallström E, Carlsson-Kanyama A, Börjesson P. Environmental impact of dietary change: a systematic review. *J Clean Prod*. 15 mars 2015;91:1-11.
131. Seconda L, Baudry J, Allès B, Hamza O, Boizot-Szantai C, Soler L-G, et al. Assessment of the Sustainability of the Mediterranean Diet Combined with Organic Food Consumption: An Individual Behaviour Approach. *Nutrients*. 12 janv 2017;9(1):61.

132. Rao M, Afshin A, Singh G, Mozaffarian D. Do healthier foods and diet patterns cost more than less healthy options? A systematic review and meta-analysis. *BMJ Open*. déc 2013;3(12):e004277.
133. Saxe H. The New Nordic Diet is an effective tool in environmental protection: it reduces the associated socioeconomic cost of diets. *Am J Clin Nutr*. 1 mai 2014;99(5):1117-25.
134. Dernini S, Berry EM. Mediterranean Diet: From a Healthy Diet to a Sustainable Dietary Pattern. *Front Nutr* [Internet]. 7 mai 2015 [cité 3 juin 2016];2. Disponible sur: http://www.frontiersin.org/Nutrition_and_Environmental_Sustainability/10.3389/fnut.2015.00015/abstract
135. León-Muñoz LM, Guallar-Castillón P, Graciani A, López-García E, Mesas AE, Aguilera MT, et al. Adherence to the Mediterranean Diet Pattern Has Declined in Spanish Adults. *J Nutr*. 10 janv 2012;142(10):1843-50.
136. Jones AD, Hoey L, Blesh J, Miller L, Green A, Shapiro LF. A Systematic Review of the Measurement of Sustainable Diets. *Adv Nutr Int Rev J*. juill 2016;7(4):641-64.
137. van de Kamp ME, van Dooren C, Hollander A, Geurts M, Brink EJ, van Rossum C, et al. Healthy diets with reduced environmental impact? – The greenhouse gas emissions of various diets adhering to the Dutch food based dietary guidelines. *Food Res Int*. févr 2018;104:14-24.
138. Vieux F, Soler L-G, Touazi D, Darmon N. High nutritional quality is not associated with low greenhouse gas emissions in self-selected diets of French adults. *Am J Clin Nutr*. 1 mars 2013;ajcn.035105.
139. Masset G, Soler L-G, Vieux F, Darmon N. Identifying Sustainable Foods: The Relationship between Environmental Impact, Nutritional Quality, and Prices of Foods Representative of the French Diet. *J Acad Nutr Diet*. juin 2014;114(6):862-9.
140. Biesbroek S, Monique Verschuren WM, van der Schouw YT, Sluijs I, Boer JMA, Temme EHM. Identification of data-driven Dutch dietary patterns that benefit the environment and are healthy. *Clim Change* [Internet]. 16 févr 2018 [cité 4 mai 2018]; Disponible sur: <http://link.springer.com/10.1007/s10584-018-2153-y>
141. Perignon M, Masset G, Ferrari G, Barré T, Vieux F, Maillot M, et al. How low can dietary greenhouse gas emissions be reduced without impairing nutritional adequacy, affordability and acceptability of the diet? A modelling study to guide sustainable food choices. *Public Health Nutr*. oct 2016;19(14):2662-74.
142. Treu H, Nordborg M, Cederberg C, Heuer T, Claupein E, Hoffmann H, et al. Carbon footprints and land use of conventional and organic diets in Germany. *J Clean Prod* [Internet]. mai 2017 [cité 24 mai 2017]; Disponible sur: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652617309666>
143. Eisinger-Watzl M, Wittig F, Heuer T, Hoffmann I. Customers Purchasing Organic Food - Do They Live Healthier? Results of the German National Nutrition Survey II. *Eur J Nutr Food Saf*. 10 janv 2015;5(1):59-71.
144. Baudry J, Pointereau P, Seconda L, Vidal R, Taupier-Letage B, Langevin B, et al. Improvement of diet sustainability with increased level of organic food in the diet: findings from the BioNutriNet cohort. *Am J Clin Nutr*. 1 avr 2019;109(4):1173-88.

145. Aston LM, Smith JN, Powles JW. Impact of a reduced red and processed meat dietary pattern on disease risks and greenhouse gas emissions in the UK: a modelling study. *BMJ Open*. 2012;2(5):e001072.
146. Soret S, Mejia A, Batech M, Jaceldo-Siegl K, Harwatt H, Sabaté J. Climate change mitigation and health effects of varied dietary patterns in real-life settings throughout North America. *Am J Clin Nutr*. 1 juill 2014;100(Supplement 1):490S-495S.
147. Dinu M, Abbate R, Gensini GF, Casini A, Sofi F. Vegetarian, vegan diets and multiple health outcomes: A systematic review with meta-analysis of observational studies. *Crit Rev Food Sci Nutr*. 22 nov 2017;57(17):3640-9.
148. Cobiac LJ, Scarborough P. Modelling the health co-benefits of sustainable diets in the UK, France, Finland, Italy and Sweden. *Eur J Clin Nutr*. avr 2019;73(4):624-33.
149. Milner J, Green R, Dangour AD, Haines A, Chalabi Z, Spadaro J, et al. Health effects of adopting low greenhouse gas emission diets in the UK. *BMJ Open*. 30 avr 2015;5(4):e007364-e007364.
150. Hercberg S, Castetbon K, Czernichow S, Malon A, Mejean C, Kesse E, et al. The Nutrinet-Santé Study: a web-based prospective study on the relationship between nutrition and health and determinants of dietary patterns and nutritional status. *BMC Public Health*. 2010;10:242.
151. Baudry J, Méjean C, Allès B, Péneau S, Touvier M, Hercberg S, et al. Contribution of Organic Food to the Diet in a Large Sample of French Adults (the NutriNet-Santé Cohort Study). *Nutrients*. 21 oct 2015;7(10):8615-32.
152. Kesse-Guyot E, Castetbon K, Touvier M, Hercberg S, Galan P. Relative Validity and Reproducibility of a Food Frequency Questionnaire Designed for French Adults. *Ann Nutr Metab*. 2010;57(3-4):153-62.
153. Nutrinet-Santé E. Table de composition des aliments de l'étude Nutrinet-Santé. Paris Econ. 2013;
154. Chauliac M, Razanamahefa L, Choma C, Boudot J, Houssin D. [National health and nutrition program: challenges of a global action plan]. *Rev Prat*. 20 janv 2009;59(1):10-2.
155. Willett W, Stampfer MJ. Total energy intake: implications for epidemiologic analyses. *Am J Epidemiol*. juill 1986;124(1):17-27.
156. ICD - ICD-10-CM - International Classification of Diseases, Tenth Revision, Clinical Modification [Internet]. 2019 [cité 5 mars 2019]. Disponible sur: <https://www.cdc.gov/nchs/icd/icd10cm.htm>
157. Lassale C, Péneau S, Touvier M, Julia C, Galan P, Hercberg S, et al. Validity of Web-Based Self-Reported Weight and Height: Results of the Nutrinet-Santé Study. *J Med Internet Res*. 8 août 2013;15(8):e152.
158. Vergnaud A-C, Touvier M, Méjean C, Kesse-Guyot E, Pollet C, Malon A, et al. Agreement between web-based and paper versions of a socio-demographic questionnaire in the NutriNet-Santé study. *Int J Public Health*. 1 août 2011;56(4):407-17.

159. Craig CL, Marshall AL, Sjoström M, Bauman AE, Booth ML, Ainsworth BE, et al. International Physical Activity Questionnaire: 12-Country Reliability and Validity: *Med Sci Sports Exerc.* août 2003;35(8):1381-95.
160. Clune S, Crossin E, Verghese K. Systematic review of greenhouse gas emissions for different fresh food categories. *J Clean Prod.* 1 janv 2017;140, Part 2:766-83.
161. Weidema BP, Meeusen MJG. *Agricultural Data for Life Cycle Assessments.* La Hague, Pays-Bas; 2000. 189 p.
162. de Ponti T, Rijk B, van Ittersum MK. The crop yield gap between organic and conventional agriculture. *Agric Syst.* avr 2012;108:1-9.
163. Seconda L, Baudry J, Allès B, Boizot-Szantai C, Soler L-G, Galan P, et al. Comparing nutritional, economic, and environmental performances of diets according to their levels of greenhouse gas emissions. *Clim Change* [Internet]. 13 avr 2018 [cité 16 avr 2018]; Disponible sur: <http://link.springer.com/10.1007/s10584-018-2195-1>
164. Goedkoop MJ, Heijungs R, Huijbregts MAJ, De Schryver A, Struijs J, Van Zelm R. *ReCiPe 2008: A Life Cycle Impact Assessment Method Which Comprises Harmonised Category Indicators at the Midpoint and the Endpoint Level.* First edition (revised). 2013.
165. van Dooren C, Aiking H, Vellinga P. In search of indicators to assess the environmental impact of diets. *Int J Life Cycle Assess.* juin 2018;23(6):1297-314.
166. Schofield WN. Predicting basal metabolic rate, new standards and review of previous work. *Hum Nutr Clin Nutr.* 1985;39 Suppl 1:5-41.
167. Hoffmann K. Application of a New Statistical Method to Derive Dietary Patterns in Nutritional Epidemiology. *Am J Epidemiol.* 15 mai 2004;159(10):935-44.
168. Cox DR. Regression Models and Life-Tables. *J R Stat Soc Ser B Methodol.* janv 1972;34(2):187-202.
169. Chiuve SE, Fung TT, Rimm EB, Hu FB, McCullough ML, Wang M, et al. Alternative Dietary Indices Both Strongly Predict Risk of Chronic Disease. *J Nutr.* 18 avr 2012;142(6):1009-18.
170. Commenges D, Jacqmin-Gadda H. *Modèle biostatistiques pour l'épidémiologie.* Louvain-la-neuve: de broeck supérieur; 2015. 393 p. (LMD).
171. Dantzig G. The Diet Problem. *Interfaces.* 1990;20(4):43-7.
172. Mausser H. Normalization and other topics in multi-objective optimization. In 2006. Disponible sur: <http://www.maths-in-industry.org/miis/233/1/fmipw1-6.pdf>
173. Birt C, Buzeti T, Grosso G, Justesen L, Lachat C, Lafronconi A, et al. Healthy and sustainable diets for European Countries. EUPHA (European Public Health Association); 2017.
174. Auestad N, Fulgoni VL. What Current Literature Tells Us about Sustainable Diets: Emerging Research Linking Dietary Patterns, Environmental Sustainability, and Economics. *Adv Nutr Int Rev J.* 1 janv 2015;6(1):19-36.

175. Temme EH, Toxopeus IB, Kramer GF, Brokens MC, Drijvers JM, Tyszler M, et al. Greenhouse gas emission of diets in the Netherlands and associations with food, energy and macronutrient intakes. *Public Health Nutr.* sept 2015;18(13):2433-45.
176. Fazeni K, Steinmüller H. Impact of changes in diet on the availability of land, energy demand, and greenhouse gas emissions of agriculture. *Energy Sustain Soc.* 9 déc 2011;1:6.
177. Andreeva VA, Deschamps V, Salanave B, Castetbon K, Verdot C, Kesse-Guyot E, et al. Comparison of Dietary Intakes Between a Large Online Cohort Study (Etude NutriNet-Santé) and a Nationally Representative Cross-Sectional Study (Etude Nationale Nutrition Santé) in France: Addressing the Issue of Generalizability in E-Epidemiology. *Am J Epidemiol.* 1 nov 2016;184(9):660-9.
178. Estaquio C, Kesse-Guyot E, Deschamps V, Bertrais S, Dauchet L, Galan P, et al. Adherence to the French Programme National Nutrition Santé Guideline Score Is Associated with Better Nutrient Intake and Nutritional Status. *J Am Diet Assoc.* juin 2009;109(6):1031-41.
179. van Dooren C, Marinussen M, Blonk H, Aiking H, Vellinga P. Exploring dietary guidelines based on ecological and nutritional values: A comparison of six dietary patterns. *Food Policy.* févr 2014;44:36-46.
180. Melina V, Craig W, Levin S. Position of the Academy of Nutrition and Dietetics: Vegetarian Diets. *J Acad Nutr Diet.* déc 2016;116(12):1970-80.
181. Lassale C, Fezeu L, Andreeva VA, Hercberg S, Kengne A-P, Czernichow S, et al. Association between dietary scores and 13-year weight change and obesity risk in a French prospective cohort. *Int J Obes.* nov 2012;36(11):1455-62.
182. Meier MS, Stoessel F, Jungbluth N, Juraske R, Schader C, Stolze M. Environmental impacts of organic and conventional agricultural products – Are the differences captured by life cycle assessment? *J Environ Manage.* févr 2015;149:193-208.
183. Nijdam D, Rood T, Westhoek H. The price of protein: Review of land use and carbon footprints from life cycle assessments of animal food products and their substitutes. *Food Policy.* 1 déc 2012;37(6):760-70.
184. Kool A, Blonk H, Ponsioen T, Sukkel W, Vermeer H, De Vries J, et al. Carbon footprints of conventional and organic pork : assessments of typical production systems in the Netherlands, Denmark, England and GermanyCarbon footprints of conventional and organic pork : assessments of typical production systems in the Netherlands, Denmark, England and Germany. *Blonk Milieuzdvis BV;* 2009.
185. Leinonen I, Williams AG, Wiseman J, Guy J, Kyriazakis I. Predicting the environmental impacts of chicken systems in the United Kingdom through a life cycle assessment: Broiler production systems. *Poult Sci.* 1 janv 2012;91(1):8-25.
186. Pairotti MB, Cerutti AK, Martini F, Vesce E, Padovan D, Beltramo R. Energy consumption and GHG emission of the Mediterranean diet: a systemic assessment using a hybrid LCA-IO method. *J Clean Prod.* sept 2015;103:507-16.
187. Cerutti AK, Beccaro GL, Bruun S, Bosco S, Donno D, Notarnicola B, et al. Life cycle assessment application in the fruit sector: State of the art and recommendations for environmental declarations of fruit products. *J Clean Prod.* juin 2014;73:125-35.

188. Hospido A, Milà i Canals L, McLaren S, Truninger M, Edwards-Jones G, Clift R. The role of seasonality in lettuce consumption: a case study of environmental and social aspects. *Int J Life Cycle Assess.* juill 2009;14(5):381-91.
189. Irz X, Leroy P, Réquillart V, Soler L-G. Welfare and sustainability effects of dietary recommendations. *Ecol Econ.* oct 2016;130:139-55.
190. Downs SM, Fanzo J. Is a Cardio-Protective Diet Sustainable? A Review of the Synergies and Tensions Between Foods That Promote the Health of the Heart and the Planet. *Curr Nutr Rep.* déc 2015;4(4):313-22.
191. Villasante S, Morato T, Rodriguez-Gonzalez D, Antelo M, Österblom H, Watling L, et al. Sustainability of deep-sea fish species under the European Union Common Fisheries Policy. *Ocean Coast Manag.* déc 2012;70:31-7.
192. ANSES. Manger du poisson : pourquoi ? comment ? | Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail [Internet]. [cité 28 sept 2017]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/content/manger-du-poisson-pourquoi-comment>
193. Barosh L, Friel S, Engelhardt K, Chan L. The cost of a healthy and sustainable diet - who can afford it? *Aust N Z J Public Health.* févr 2014;38(1):7-12.
194. Baudry J, Allès B, Péneau S, Touvier M, Méjean C, Hercberg S, et al. Dietary intakes and diet quality according to levels of organic food consumption by French adults: cross-sectional findings from the NutriNet-Santé Cohort Study. *Public Health Nutr.* mars 2017;20(04):638-48.
195. Gilg A, Barr S, Ford N. Green consumption or sustainable lifestyles? Identifying the sustainable consumer. *Futures.* août 2005;37(6):481-504.
196. Panzone L, Hilton D, Sale L, Cohen D. Socio-demographics, implicit attitudes, explicit attitudes, and sustainable consumption in supermarket shopping. *J Econ Psychol.* août 2016;55:77-95.
197. Cafiero C, Melgar-Quiñonez HR, Ballard TJ, Kepple AW. Validity and reliability of food security measures: Validity and reliability of food security measures. *Ann N Y Acad Sci.* déc 2014;1331(1):230-48.
198. Allen T, Prosperi P. Modeling Sustainable Food Systems. *Environ Manage.* mai 2016;57(5):956-75.
199. Johnston JL, Fanzo JC, Cogill B. Understanding Sustainable Diets: A Descriptive Analysis of the Determinants and Processes That Influence Diets and Their Impact on Health, Food Security, and Environmental Sustainability. *Adv Nutr Int Rev J.* 1 juill 2014;5(4):418-29.
200. Mushtag U, Molino N, Bignet V, Singh S, Johan R, Gunhild S. Integrated indicators for sustainable food systems and healthy diets in the post-2015 development agenda. 2015.
201. Remans R, Wood SA, Saha N, Anderman TL, DeFries RS. Measuring nutritional diversity of national food supplies. *Glob Food Secur.* nov 2014;3(3-4):174-82.
202. Weiler AM, Hergesheimer C, Brisbois B, Wittman H, Yassi A, Spiegel JM. Food sovereignty, food security and health equity: a meta-narrative mapping exercise. *Health Policy Plan.* 1 oct 2015;30(8):1078-92.

203. Swindale A, Bilinsky P. Development of a Universally Applicable Household Food Insecurity Measurement Tool: Process, Current Status, and Outstanding Issues. *mai* 2006;136(5):14495-525.
204. Lele U, Masters W, Kinabo J, Meenakshi J, Ramaswami B, Tagwireyi J, et al. Measuring Food and Nutrition Security: An Independent Technical Assessment and User's Guide for Existing Indicators [Internet]. FSIN Food Security Information Network; 2016. Disponible sur: https://www.researchgate.net/profile/Uma_Lele/publication/308420144_Measuring_Food_and_Nutrition_Security_An_Independent_Technical_Assessment_and_User%27s_Guide_for_Existing_Indicators/links/57e42b1108ae06097a0bf65d/Measuring-Food-and-Nutrition-Security-An-Independent-Technical-Assessment-and-Users-Guide-for-Existing-Indicators.pdf
205. Streiner DL, Norman GR, Cairney J. *Health Measurement Scales: A Practical Guide to Their Development and Use*. Oxford University Press; 2015. 415 p.
206. Bland JM, Altman DG. Validating scales and indexes. *BMJ*. 9 mars 2002;324(7337):606-7.
207. Asal S, Geoffroy E, Dely simon, Gauffier A, Uthayakumar T. Vers une alimentation bas carbone, saine et abordable [Internet]. WWF and ECO2 initiative; 2017. Disponible sur: https://www.wwf.fr/sites/default/files/doc-2017-11/171109_rapport_vers_une_alimentation_bas_carbone_saine_abordable_0.pdf
208. Panagiotakos D. Health Measurement Scales: Methodological Issues. *Open Cardiovasc Med J*. 23 nov 2009;3:160-5.
209. Waijers PMCM, Feskens EJM, Ocké MC. A critical review of predefined diet quality scores. *Br J Nutr*. févr 2007;97(02):219.
210. van Dooren C, Douma A, Aiking H, Vellinga P. Proposing a Novel Index Reflecting Both Climate Impact and Nutritional Impact of Food Products. *Ecol Econ*. janv 2017;131:389-98.
211. Andreeva VA, Salanave B, Castetbon K, Deschamps V, Vernay M, Kesse-Guyot E, et al. Comparison of the sociodemographic characteristics of the large NutriNet-Santé e-cohort with French Census data: the issue of volunteer bias revisited. *J Epidemiol Community Health*. 1 avr 2015;jech-2014-205263.
212. Baudry J, Méjean C, Péneau S, Galan P, Hercberg S, Lairon D, et al. Health and dietary traits of organic food consumers: results from the NutriNet-Santé study. *Br J Nutr*. déc 2015;114(12):2064–2073.
213. Kesse-Guyot E, Péneau S, Méjean C, Edelenyi FS de, Galan P, Hercberg S, et al. Profiles of Organic Food Consumers in a Large Sample of French Adults: Results from the Nutrinet-Santé Cohort Study. *PLOS ONE*. 18 oct 2013;8(10):e76998.
214. Desquilbet L, Mariotti F. Dose-response analyses using restricted cubic spline functions in public health research. *Stat Med*. 29(9):1037-57.
215. Seconda L, Baudry J, Pointereau P, Lacour C, Langevin B, Hercberg S, et al. Development and validation of an individual sustainable diet index in the NutriNet-Santé study cohort. *Br J Nutr*. 11 avr 2019;1-12.

216. Sáez-Almendros S, Obrador B, Bach-Faig A, Serra-Majem L. Environmental footprints of Mediterranean versus Western dietary patterns: beyond the health benefits of the Mediterranean diet. *Environ Health*. 2013;12:118.
217. Derbyshire EJ. Flexitarian Diets and Health: A Review of the Evidence-Based Literature. *Front Nutr* [Internet]. 2017 [cité 6 mars 2019];3. Disponible sur: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnut.2016.00055/full>
218. Fritzen AM, Lundsgaard A-M, Jordy AB, Poulsen SK, Stender S, Pilegaard H, et al. New Nordic Diet–Induced Weight Loss Is Accompanied by Changes in Metabolism and AMPK Signaling in Adipose Tissue. *J Clin Endocrinol Metab*. 1 sept 2015;100(9):3509-19.
219. Williams EP, Mesidor M, Winters K, Dubbert PM, Wyatt SB. Overweight and Obesity: Prevalence, Consequences, and Causes of a Growing Public Health Problem. *Curr Obes Rep*. sept 2015;4(3):363-70.
220. Mozaffarian D. Dietary and Policy Priorities for Cardiovascular Disease, Diabetes, and Obesity – A Comprehensive Review. *Circulation*. 12 janv 2016;133(2):187-225.
221. World Cancer Research Fund/American Institute for Cancer Research. Diet, Nutrition, Physical Activity and Cancer: a Global Perspective. Continuous Update Project Expert Report 2018. [Internet]. 2018 [cité 19 sept 2018]. Disponible sur: dietandcancerreport.org
222. Carlos S, De La Fuente-Arrillaga C, Bes-Rastrollo M, Razquin C, Rico-Campà A, Martínez-González M, et al. Mediterranean Diet and Health Outcomes in the SUN Cohort. *Nutrients*. 31 mars 2018;10(4):439.
223. Galbete C, Schwingshackl L, Schwedhelm C, Boeing H, Schulze MB. Evaluating Mediterranean diet and risk of chronic disease in cohort studies: an umbrella review of meta-analyses. *Eur J Epidemiol*. oct 2018;33(10):909-31.
224. United States Department of Agriculture (USDA). A series of Systematic Reviews on the Relationship Between Dietary Patterns and Health Outcomes [Internet]. Evidence Analysis Library Division Center for Nutrition Policy and Production; 2014 [cité 27 sept 2018]. Disponible sur: https://www.cnpp.usda.gov/sites/default/files/usda_nutrition_evidence_library/DietaryPatternsReport-FullFinal.pdf
225. Asghari G, Mirmiran P, Yuzbashian E, Azizi F. A systematic review of diet quality indices in relation to obesity. *Br J Nutr*. avr 2017;117(08):1055-65.
226. Aljadani H, Patterson A, Sibbritt D, Collins CE. Diet Quality and Weight Change in Adults Over Time: A Systematic Review of Cohort Studies. *Curr Nutr Rep*. 1 mars 2015;4(1):88-101.
227. Rouhani MH, Salehi-Abargouei A, Surkan PJ, Azadbakht L. Is there a relationship between red or processed meat intake and obesity? A systematic review and meta-analysis of observational studies. *Obes Rev*. 15(9):740-8.
228. Średnicka-Tober D, Barański M, Seal CJ, Sanderson R, Benbrook C, Steinshamn H, et al. Higher PUFA and n-3 PUFA, conjugated linoleic acid, α -tocopherol and iron, but lower iodine and selenium concentrations in organic milk: a systematic literature review and meta- and redundancy analyses. *Br J Nutr*. mars 2016;115(06):1043-60.

229. Średnicka-Tober D, Barański M, Seal C, Sanderson R, Benbrook C, Steinshamn H, et al. Composition differences between organic and conventional meat: a systematic literature review and meta-analysis. *Br J Nutr.* mars 2016;115(06):994-1011.
230. Barański M, Średnicka-Tober D, Volakakis N, Seal C, Sanderson R, Stewart GB, et al. Higher antioxidant and lower cadmium concentrations and lower incidence of pesticide residues in organically grown crops: a systematic literature review and meta-analyses. *Br J Nutr.* sept 2014;112(05):794-811.
231. Baudry J, Debrauwer L, Durand G, Limon G, Delcambre A, Vidal R, et al. Urinary pesticide concentrations in French adults with low and high organic food consumption: results from the general population-based NutriNet-Santé. *J Expo Sci Environ Epidemiol* [Internet]. 5 sept 2018 [cité 26 nov 2018]; Disponible sur: <http://www.nature.com/articles/s41370-018-0062-9>
232. Curl Cynthia L., Beresford Shirley A.A., Fenske Richard A., Fitzpatrick Annette L., Lu Chensheng, Nettleton Jennifer A., et al. Estimating Pesticide Exposure from Dietary Intake and Organic Food Choices: The Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis (MESA). *Environ Health Perspect.* 1 mai 2015;123(5):475-83.
233. Oates L, Cohen M, Braun L, Schembri A, Taskova R. Reduction in urinary organophosphate pesticide metabolites in adults after a week-long organic diet. *Environ Res.* 1 juill 2014;132:105-11.
234. Thayer KA, Heindel JJ, Bucher JR, Gallo MA. Role of environmental chemicals in diabetes and obesity: a national toxicology program workshop review. *Chem Hazards Ind.* 1 août 2012;120(6):779-89.
235. Lukowicz C, Ellero-Simatos S, Régnier M, Polizzi A, Lasserre F, Montagner A, et al. Metabolic Effects of a Chronic Dietary Exposure to a Low-Dose Pesticide Cocktail in Mice: Sexual Dimorphism and Role of the Constitutive Androstane Receptor. *Environ Health Perspect* [Internet]. juin 2018 [cité 20 août 2018];126(06). Disponible sur: <https://ehp.niehs.nih.gov/EHP2877>
236. Mostafalou S, Abdollahi M. Pesticides: an update of human exposure and toxicity. *Arch Toxicol.* févr 2017;91(2):549-99.
237. Malik VS, Schulze MB, Hu FB. Intake of sugar-sweetened beverages and weight gain: a systematic review. *Am J Clin Nutr.* 1 août 2006;84(2):274-88.
238. Chassaing B, Koren O, Goodrich JK, Poole AC, Srinivasan S, Ley RE, et al. Dietary emulsifiers impact the mouse gut microbiota promoting colitis and metabolic syndrome. *Nature.* mars 2015;519(7541):92-6.
239. Magliano DJ, Lyons JG. Bisphenol A and Diabetes, Insulin Resistance, Cardiovascular Disease and Obesity: Controversy in a (Plastic) Cup? *J Clin Endocrinol Metab.* 1 févr 2013;98(2):502-4.
240. Wolfson JA, Bleich SN. Is cooking at home associated with better diet quality or weight-loss intention? *Public Health Nutr.* juin 2015;18(08):1397-406.
241. O’Kane G. A moveable feast: Contemporary relational food cultures emerging from local food networks. *Appetite.* oct 2016;105:218-31.

242. Montani J-P, Schutz Y, Dulloo AG. Dieting and weight cycling as risk factors for cardiometabolic diseases: who is really at risk?: Weight cycling and cardiometabolic risks. *Obes Rev.* févr 2015;16:7-18.
243. Alberga AS, McLaren L, Russell-Mayhew S, von Ranson KM. Canadian Senate Report on Obesity: Focusing on Individual Behaviours versus Social Determinants of Health May Promote Weight Stigma. *J Obes.* 2 juill 2018;2018:1-7.
244. Green MA. Do we need to think beyond BMI for estimating population-level health risks? *J Public Health.* 1 mars 2016;38(1):192-3.
245. Hall KD, Sacks G, Chandramohan D, Chow CC, Wang YC, Gortmaker SL, et al. Quantification of the effect of energy imbalance on bodyweight. *The Lancet.* août 2011;378(9793):826-37.
246. Fresán U, Martínez-González MA, Sabaté J, Bes-Rastrollo M. Global sustainability (health, environment and monetary costs) of three dietary patterns: results from a Spanish cohort (the SUN project). *BMJ Open.* févr 2019;9(2):e021541.
247. Nelson ME, Hamm MW, Hu FB, Abrams SA, Griffin TS. Alignment of Healthy Dietary Patterns and Environmental Sustainability: A Systematic Review. *Adv Nutr Int Rev J.* nov 2016;7(6):1005-25.
248. Diet and Cancer [Internet]. World Cancer Research Fund. 2018 [cité 5 mars 2019]. Disponible sur: <https://www.wcrf.org/dietandcancer>
249. Bouvard V, Loomis D, Guyton KZ, Grosse Y, Ghissassi FE, Benbrahim-Tallaa L, et al. Carcinogenicity of consumption of red and processed meat. *Lancet Oncol.* déc 2015;16(16):1599-600.
250. Bechthold A, Boeing H, Schwedhelm C, Hoffmann G, Knüppel S, Iqbal K, et al. Food groups and risk of coronary heart disease, stroke and heart failure: A systematic review and dose-response meta-analysis of prospective studies. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 17 oct 2017;1-20.
251. Schwingshackl L, Hoffmann G. Diet Quality as Assessed by the Healthy Eating Index, the Alternate Healthy Eating Index, the Dietary Approaches to Stop Hypertension Score, and Health Outcomes: A Systematic Review and Meta-Analysis of Cohort Studies. *J Acad Nutr Diet.* mai 2015;115(5):780-800.e5.
252. Mayhew AJ, Souza RJ de, Meyre D, Anand SS, Mente A. A systematic review and meta-analysis of nut consumption and incident risk of CVD and all-cause mortality. *Br J Nutr.* janv 2016;115(2):212-25.
253. Turner-McGrievy G, Mandes T, Crimarco A. A plant-based diet for overweight and obesity prevention and treatment. *J Geriatr Cardiol JGC.* mai 2017;14(5):369-74.
254. Eichelmann F, Schwingshackl L, Fedirko V, Aleksandrova K. Effect of plant-based diets on obesity-related inflammatory profiles: a systematic review and meta-analysis of intervention trials: Effect of plant-based diets on inflammatory profiles. *Obes Rev.* nov 2016;17(11):1067-79.
255. Maillot M, Vieux F, Amiot MJ, Darmon N. Individual diet modeling translates nutrient recommendations into realistic and individual-specific food choices. *Am J Clin Nutr.* 1 févr 2010;91(2):421-30.

256. Pointereau P. Le revers de notre assiette changer d'alimentation pour préserver notre santé et notre environnement. Toulouse: Solagro; 2019 juin.
257. Barnes S. The biochemistry, chemistry and physiology of the isoflavones in soybeans and their food products. *Lymphat Res En Biol.* 17 mars 2010;8(1).
258. Boerema A, Peeters A, Swolfs S, Vandevenne F, Jacobs S, Staes J, et al. Soybean Trade: Balancing Environmental and Socio-Economic Impacts of an Intercontinental Market. Zia A, éditeur. *PLOS ONE.* 31 mai 2016;11(5):e0155222.
259. Barré T, Perignon M, Gazan R, Vieux F, Micard V, Amiot M-J, et al. Integrating nutrient bioavailability and co-production links when identifying sustainable diets: How low should we reduce meat consumption? de Souza RJ, éditeur. *PLOS ONE.* 14 févr 2018;13(2):e0191767.
260. Frank S, Laharnar N, Kullmann S, Veit R, Canova C, Hegner YL, et al. Processing of food pictures: Influence of hunger, gender and calorie content. *Brain Res.* sept 2010;1350:159-66.
261. Avis relatif à la révision des repères alimentaires pour les adultes du futur Programme national nutrition santé 2017-2021 [Internet]. Haut conseil de la santé publique; 2017. Disponible sur:
file:///C:/Users/LDBED~1/SEC/AppData/Local/Temp/hcspa20170216_reperesalimentairesactua2017.pdf
262. Żakowska-Biemans S, Pieniak Z, Kostyra E, Gutkowska K. Searching for a Measure Integrating Sustainable and Healthy Eating Behaviors. *Nutrients.* 5 janv 2019;11(1):95.
263. Tobler C, Visschers VHM, Siegrist M. Eating green. Consumers' willingness to adopt ecological food consumption behaviors. *Appetite.* déc 2011;57(3):674-82.
264. GreenFlex, ADEME. typologie des consommateurs 2016: des français de plus en plus engagés... Mais chacun à leur manière.
265. Joinson A. Social desirability, anonymity, and internet-based questionnaires. *Behav Res Methods Instrum Comput.* sept 1999;31(3):433-8.
266. Seconda L, Péneau S, Bénard M, Allès B, Hercberg S, Galan P, et al. Is organic food consumption associated with life satisfaction? A cross-sectional analysis from the NutriNet-Santé study. *Prev Med Rep.* déc 2017;8:190-6.
267. Diener E, Emmons RA, Larsen RJ, Griffin S. The Satisfaction With Life Scale. *J Pers Assess.* févr 1985;49(1):71-5.
268. Feller S, Teucher B, Kaaks R, Boeing H, Vigi M. Life Satisfaction and Risk of Chronic Diseases in the European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition (EPIC)-Germany Study. *PLOS ONE.* 20 août 2013;8(8):e73462.
269. Koivumaa-Honkanen H, Honkanen R, Viinamäki H, Heikkilä K, Kaprio J, Koskenvuo M. Life Satisfaction and Suicide: A 20-Year Follow-Up Study. *Am J Psychiatry.* 1 mars 2001;158(3):433-9.
270. Kim ES, Park N, Sun JK, Smith J, Peterson C. Life Satisfaction and Frequency of Doctor Visits. *Psychosom Med.* janv 2014;76(1):86-93.

271. Dolan P, Peasgood T, White M. Do we really know what makes us happy? A review of the economic literature on the factors associated with subjective well-being. *J Econ Psychol.* févr 2008;29(1):94-122.
272. Holder MD. The Contribution of Food Consumption to Well-Being. *Ann Nutr Metab.* 2019;74(Suppl. 2):44-52.
273. Crépet A, Tressou J, Graillet V, Béchaux C, Pierlot S, Héraud F, et al. Identification of the main pesticide residue mixtures to which the French population is exposed. *Environ Res.* oct 2013;126:125-33.
274. Scarborough P, Harrington RA, Mizdrak A, Zhou LM, Doherty A. The Preventable Risk Integrated ModEl and Its Use to Estimate the Health Impact of Public Health Policy Scenarios. *Scientifica.* 2014;2014:1-21.

Résumé

Rendre les systèmes alimentaires durables est une nécessité pour ne pas dépasser les limites planétaires et garantir une vie dans de bonnes conditions aux prochaines générations. Cette thèse propose d'évaluer la durabilité de l'alimentation à une échelle individuelle en intégrant des indicateurs relatifs à l'environnement, l'économie ou le socio-culturel et la nutrition.

Les travaux de cette thèse se basent sur les données de la cohorte NutriNet-Santé et celles recueillies lors du projet ANR-BioNutriNet. En particulier, le projet BioNutriNet a permis de recueillir des données sur les impacts environnementaux de la production de nombreux aliments en distinguant les modes de production biologique et conventionnel, ainsi que le prix des aliments en distinguant également les modes de production et les lieux d'achat. Nous avons proposé trois approches pour distinguer les comportements alimentaires selon leur durabilité au sein de notre cohorte : une approche se basant uniquement sur les émissions de gaz à effet de serre liées à la production des régimes alimentaires, une approche plus exploratoire donnant lieu à une typologie et enfin une approche *a priori* consistant à créer un indice d'évaluation de la durabilité des régimes alimentaires français. Dans un second temps, nous avons évalué les associations entre les régimes identifiés comme durables et les survenues d'obésité, de surpoids, de cancer et/ou de maladie cardiovasculaire et avec la prise de masse corporelle. Enfin, à partir des données, nous avons proposé des solutions plus ou moins conservatrices de régimes alimentaires durables en utilisant l'optimisation.

Les résultats de ce travail montrent qu'au sein de la cohorte il est possible d'identifier des différences de comportements alimentaires selon leur durabilité. La structure de ces régimes plus durable ne diffère que très peu selon l'approche choisie. Les proportions en masse des groupes alimentaires dans les régimes alimentaires les plus durables sont d'environ 50% de fruits et légumes, 15% de féculents, 10% de produits laitiers, 3% de viande et 2% de poisson, 4% de soja. La différence la plus importante entre les trois approches concerne la contribution des aliments biologiques dans les régimes. On a observé une diminution du risque de survenue de l'obésité, du surpoids et des cancers pour les personnes adoptant les comportements alimentaires les plus durables selon nos indicateurs. Enfin, les solutions de l'optimisation montrent qu'en allant vers les scénarios les plus disruptifs, les contributions des fruits, légumes, féculents et sojas augmentent alors que celles des aliments d'origine animale et des aliments gras et sucrés ou salés diminuent. Ceci, peu importe le niveau de végétalisation des régimes de départ. Plusieurs solutions pourraient permettre de répondre aux enjeux environnementaux, tout en restant accessibles économiquement et en couvrant les besoins nutritionnels. Le choix du scénario sera à discuter au regard de l'effort que l'on souhaite faire porter à l'alimentation par rapport aux autres domaines.

Finalement, les travaux menés au cours de cette thèse ont permis d'identifier et de proposer des régimes de bonne qualité nutritionnelle et parvenant à répondre en partie aux urgences environnementales et de santé publique tout en tentant de veiller à leur accessibilité économique et à leur acceptabilité. Dans un contexte de systèmes alimentaires non viables sur le long terme et d'une prévalence importante et croissante des maladies chroniques, ces résultats sont importants pour justifier la prise en compte de la durabilité dans les politiques agricoles et de santé publique.

Abstract

In order to not exceed the environmental planetary boundaries and ensure a good life for future generations, the food systems have to be sustainable. This thesis proposes to assess the sustainability of dietary patterns by integrating environmental, economic or socio-cultural and nutrition indicators.

This thesis is based on data from the NutriNet-Santé cohort and those collected in the BioNutriNet project. In particular, during the BioNutriNet project data on the environmental impacts of food production by distinguishing between organic and conventional production methods, as well as food prices by also distinguishing production methods and places of purchase were collected. We proposed three approaches to evaluate the sustainability of dietary patterns within the cohort: an approach based on greenhouse gas emissions related to the production of diets, a more exploratory approach leading to a typology and finally an *a priori* approach consisting of creating an index to assess the sustainability of French diets. In a second step, we assessed the associations between diets identified as sustainable and the risk of obesity, overweight, cancer and/or cardiovascular disease and with body weight gain. Finally, from the data, we proposed more or less conservative solutions for sustainable diets using optimization.

We were able to identify different dietary patterns according to their sustainability. The approach chosen has little impact on the structure of the most sustainable diets. The proportion of food groups in these most sustainable diets were almost 50% fruit and vegetables, 15% starch, 10% dairy products, 3% meat and 2% fish, and 4% soybean products. The most important difference between the three approaches relies on the contribution of organic foods to diets. We have observed a decrease in the risk of obesity, overweight and cancer for those who adopted the most sustainable dietary patterns. Finally, solutions from the optimization showed that from the least to the most disruptive scenarios, the contributions of fruits, vegetables, starch and soybean increase while those of animal foods and fatty and sweet foods decrease. Trends were independent of the level of vegetal-based food in the initial diets. Several solutions could be found to meet environmental challenges, while remaining economically accessible and covering the main nutritional needs. The choice of scenarios will have to be discussed in the light of the effort that we want to make on food in relation to other areas.

Finally, the work carried out during this thesis showed that it is possible to identify and propose diets on good nutritional quality and to meet in part to environmental and public health emergencies while trying to ensure their economic accessibility and acceptability. In the context of unsustainable

food systems and an increasing prevalence of chronic diseases, these results may be of major interest to justify the integration of sustainability into agricultural and public health policies.

Annexes

- 1- Extrait du questionnaire sur les fréquences de consommation des produits issus de l'agriculture biologique
- 2- Liste des 264 items du questionnaire sur les fréquences de consommation des produits issus de l'agriculture biologique (FFQ-bio)
- 3- Distribution du score provegetarien au sein de l'échantillon d'étude de l'optimisation (N=12 166)
- 4- Articles :
 - Comparing nutritional, economic, and environmental performances of diets according to their levels of greenhouse gas emissions
 - Identification of sustainable dietary patterns by a multicriteria approach in the NutriNet-Santé cohort
 - Development and validation of an individual sustainable diet index in the NutriNet-Santé study cohort
 - Association between sustainable dietary patterns and body weight, overweight and obesity risk in the NutriNet-Santé prospective cohort
 - Prospective associations between sustainable dietary pattern assessed with the Sustainable Diet Index (SDI) and risk of cancer and cardiovascular diseases in the French NutriNet-Santé cohort

Annexe 1 : Extrait du questionnaire sur les fréquences de consommation des produits issus de l'agriculture biologique

- 1 - Introduction
- 2 - Le BIO partie 1
- 3 - Le BIO partie 2
- 4 - Le BIO partie 3
- 5 - Le BIO partie 4
- 6 - Le BIO partie 5
- 7 - Le BIO partie 6
- 8 - Le BIO partie 7
- 9 - Le BIO partie 8
- 10 - Le BIO partie 9

Le BIO partie 1

Vous arrive-t-il de consommer des fruits ou des jus de fruits BIO ?

- Oui, la plupart du temps
- Oui, de temps en temps
- Non, c'est trop cher
- Non, je n'en trouve pas là où je fais mes courses
- Non, ça m'est égal
- Non, j'évite
- Je ne sais pas
- Je ne consomme jamais ces aliments

Vous arrive-t-il de consommer des légumes BIO ?

- Oui, la plupart du temps
- Oui, de temps en temps
- Non, c'est trop cher
- Non, je n'en trouve pas là où je fais mes courses
- Non, ça m'est égal
- Non, j'évite
- Je ne sais pas
- Je ne consomme jamais ces aliments

Vous arrive-t-il de consommer du soja ou des produits à base de soja BIO ?

- Oui, la plupart du temps
- Oui, de temps en temps
- Non, c'est trop cher
- Non, je n'en trouve pas là où je fais mes courses
- Non, ça m'est égal
- Non, j'évite
- Je ne sais pas
- Je ne consomme jamais ces aliments

Vous arrive-t-il de consommer des produits laitiers BIO ?

- Oui, la plupart du temps
- Oui, de temps en temps
- Non, c'est trop cher
- Non, je n'en trouve pas là où je fais mes courses
- Non, ça m'est égal
- Non, j'évite
- Je ne sais pas
- Je ne consomme jamais ces aliments

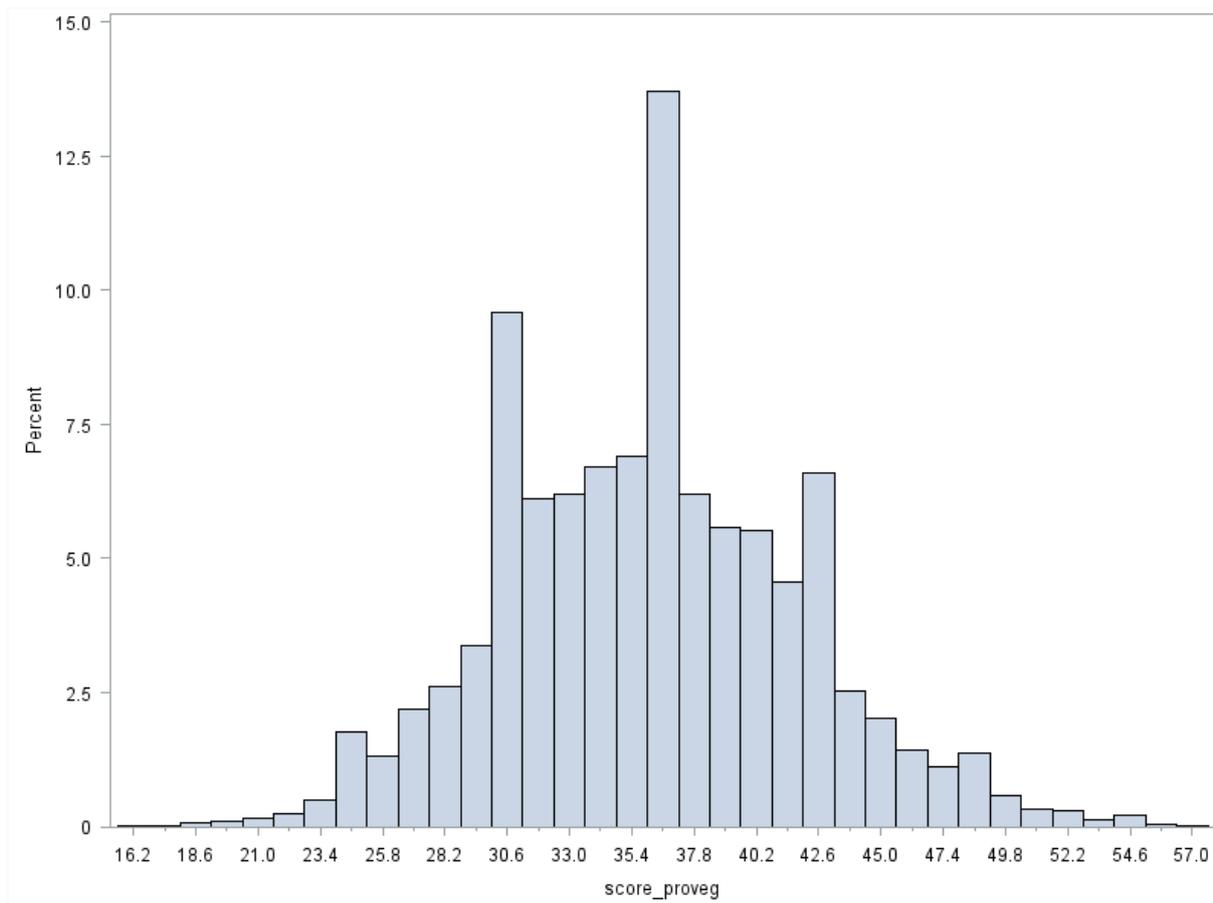
Annexe 2 : liste des 264 items du questionnaire sur les fréquences de consommation des produits issus de l'agriculture biologique (FFQ-Bio)

abricot	huile_noix
agneau_cote	huile_olive
agneau_epaule	huile_pepins
agneau_saute	huile_sesame
agrume	huile_soja
ail	huile_tournesol
alcool_anise	Infusion
alcool_fort	jambon_blanc
algue	jambon_cru
ananas	jambon_veg
aperitif	jus_fruit
artichaut	jus_nectar
asiatique	jus_purjus
avocat	ketchup
banane	kiwi
barre_chocolat	kombucha
betterave	lait_demi_ecreme
beurre_cuisson	lait_ecreme
beurre_tartine	lait_entier
biere	lait_fermente
biere_sans_alcool	lait_soja
biscotte	lapin
biscuit_sec	lardons
biscuit_sec_chocolat	legumes_secs
boeuf_braise	levure_biere
boeuf_cote	liqueur
boeuf_roti	litchi
bonbon	mais
brioche	mangue
brocolis	mayo
brownie	melon
cafe_lait	miel_confiture
cafe_lait_veg	mortadelle
cafe_noir	moutarde
cake	muesli_nature
carottes	navet
cassoulet	nutella
celeri	oeuf_coque
cereales_aromatisees	oeuf_plat
cereales_muesli	oignon
cereales_natures	oleagineux_non_sales
cereales_son	oleagineux_sales
cerise	pain_blanc
cervelas	pain_complet
champignon	panini
chantilly	pate
chicoree_lait	pate_veg
chicoree_lait_veg	pates
chicoree_nature	pates_completes
chips	pdt_eau
chocolat	pdt_frites

chocolat_chaud	pdt_puree
chocolat_chaud_veg	pdt_sautees
chorizo_veg	peche
chou_blanc	petit_gateau
chou_fleur	petit_pois
chou_rouge	petit_suisse
chou_vert	pizza
choucroute	poire
choux_bruxelles	poireau
cidre	poisson_gras
cocktail	poisson_maigre
compote	poisson_migras
compote_sanssucre	poisson_pane
concombre	poivron
cone	pomme
coquillage	popcorn
creme_caramel	porc_cote
creme_fraiche	porc_echine
creme_fraiche_allegee	porc_filet
creme_vegetale	porc_roti
crepe_salee	pot_au_feu
crepe_sucree	potiron
croque_monsieur	prune
crustace	puree_oleagineux
digestif	quiche
dinde	quinoa
dinde_peau	raisin
eau_minerale	raviolis
eau_robinet	rillettes
eau_source	riz_blanc
edulcorant	riz_complet
endive	riz_sauvage
entremet	salade_pdt
entremet_veg_sans_soja	salade_verte
entremet_veg_soja	sandwich_grec
epinards	sauce_bechamel
fenouil	sauce_jus
flan	sauce_pates
foie	sauce_tartare
fraise	sauce_viande
fromage_allege	saucisses
fromage_bleu	saucisson
fromage_brie	seitan
fromage_chevre	semoule
fromage_edam	sirop
fromage_fondu	soda
fromage_frais	soda_light
fromage_frais_veg	son
fromage_gouda	son
fromage_mozzarella	sorbet
fromage_veg_sans_soja	soupe_legume
fromage_veg_soja	steak_hache
fromageblanc_20	steak_soja
	substitut_viande

fromageblanc_20_fruit	sucre
fromageblanc_40	tarte_fruits
fromageblanc_40_brebis	the
fromageblanc_40_chevre	the_lait
fromageblanc_40_fruit	the_lait_veg
fromageblanc_zero	tofu
fromageblanc_zero_aspartame	tomate
fruit_exotique	topinambour
fruits_secs	tripes
fruits_sirop	veau_cote
galette_cereales	veau_escalope
galettes_veg	veau_roti
gateau_aperitif	veau_saute
gateau_creme	viande_panee
germe_ble	viennoiserie
glace	vin_blanc
grains	vin_rouge
graines_germees	vinaigrette
hamburger	yaourt_bifidus
haricots_verts	yaourt_bifidus_fruit
huile_arachide	yaourt_demi_ecreme
huile_carthame	yaourt_demi_ecreme_fruit
huile_coco	yaourt_entier
huile_colza	yaourt_entier_fruit
huile_lin	yaourt_soja
huile_mais	yaourt_zero
huile_melangee	yaourt_zero_aspartame
huile_noisette	yaourt_zero_fruit

Annexe 3 : Distribution du score provegetarien au sein de l'échantillon d'étude de l'optimisation



Moyenne	36,00	Ecart-type	5,76
Médiane	36,00	Ecart interquartile	8,00
25% Q1	32,00	75% Q3	40,00
Min	16,00	Max	57,00